



TITLE:

ブライトネスの照明設計への応用 に関する研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

武内, 徹二

CITATION:

武内, 徹二. ブライトネスの照明設計への応用に関する研究. 京都大学, 1996, 博士(工学)

ISSUE DATE:

1996-03-23

URL:

<https://doi.org/10.11501/3110672>

RIGHT:

(2)

ブライトネスの照明設計 への応用に関する研究

平成7年12月

武内 徹二

ブライトネスの照明設計への応用に関する研究

目 次

第1章 序論	1
1. 1 はじめに	1
1. 2 ブライトネスとは	3
1. 3 ブライトネスの応用効果	4
1. 4 従来の研究とその応用	7
1. 4. 1 ブライトネスの研究の歴史的経緯	7
1. 4. 2 ブライトネスの応用の試みとその課題	12
[参考文献]	14
第2章 複雑な視野に対する順応に関する計測	17
2. 1 順応状態の定量化の考え方	17
2. 2 輝度差弁別閾と視野輝度に関する研究	18
2. 2. 1 輝度差弁別閾の要因	18
2. 2. 2 中心窩が順応している輝度と輝度差弁別閾との 関係に関する実験	20
2. 2. 3 周辺視野の輝度分布と輝度差弁別閾との関係に 関する実験	23
2. 2. 4 複雑な視野での輝度差弁別閾に関する実験	29
2. 3 複雑な視野に対する順応に関する計測	35
2. 3. 1 輝度差弁別閾の計測	35
2. 3. 2 順応輝度の計測	38
[参考文献]	40
第3章 ブライトネスの尺度に関する研究	44
3. 1 従来 of 尺度	44
3. 2 実用的尺度の要件と従来の問題点	46
3. 3 ブライトネスの実用尺度に関する実験検討	48
3. 3. 1 実用尺度の基本的条件	48
3. 3. 2 実用尺度の作成	49
3. 3. 3 ブライトネスの尺度の拡張	54
3. 4 ブライトネスの定量化	57
3. 4. 1 定量化式の考え方	57

3. 4. 2 定量化式算出のためのデータを得る実験	59
3. 4. 2. 1 定量化データを得るための実験1	60
3. 4. 2. 2 定量化データを得るための実験2	64
3. 4. 3 定量化式の解析	67
3. 5 従来の研究との比較	70
3. 6 対象物に隣接する背景輝度の影響	73
[参考文献]	79
第4章 ブライトネスの計測	81
4. 1 ブライトネスの計測理論	81
4. 1. 1 計測理論	81
4. 1. 2 検証実験	83
4. 1. 2. 1 屋外照明視環境での検証実験	83
4. 1. 2. 2 屋内照明視環境での検証実験	87
4. 1. 3 高齢者のブライトネスの一考察	89
4. 2 ブライトネスの測定	92
4. 2. 1 測定装置	92
4. 2. 2 測定例	95
[参考文献]	101
第5章 ブライトネスの照明設計への応用	103
5. 1 オフィス照明	103
5. 1. 1 照明器具の特性による顔のブライトネスの変化	104
5. 1. 2 シルエット現象の防止	109
5. 2 道路トンネル照明	111
5. 2. 1 観測実験	112
5. 2. 2 先行車の視認性を確保するための照明要件の解析	119
5. 3 その他	124
5. 3. 1 店舗の局所照明の効果	124
5. 3. 2 屋外ディスプレイの輝度要件	126
[参考文献]	128
第6章 結論	129
発表論文	132
謝 辞	134

第1章 序論

1. 1 はじめに

照明の役割は、人間の視知覚に対して適切な光環境を提供し、人間がその環境下で必要な視覚情報を的確に収集できるようにすることである。ここで、私たちの視知覚の能力や収集できる情報の量は、その視野内の明るさや見ようとする物の明るさによって強く影響され、一般に明るいほど物が見えやすくなる。

このため、照明技術の分野では、たとえばランプについては如何に少ない電気エネルギーから多くの光を発生させるかという明るさの効率（ランプ効率と呼ばれている）の改善を目標として研究開発が進められている。また、照明器具の開発では、ランプから放射される光を如何に有効な方向に放射するかという明るさの効率（器具効率と呼ばれている）の改善を目標に研究開発が進められている。ここで、ランプ効率の高いランプや器具効率の高い照明器具が開発されても、それらを有効に活用できないと適切な視環境が実現できないし、また明るさの効率が高い環境は実現できない。そこで、どこをどの程度の照度や輝度になるように照明する必要があるか、また、そのためにはどのようなランプや照明器具をどのように配置すべきかといった照明設計の技術が重要になる。この照明設計技術においても、照明に投入される電気エネルギーに対して、如何に適切な明るさの照明環境を実現するかといった明るさ効率の改善を目標に研究開発が進められている。しかし、今日ではランプや照明器具などの照明機器や、照明設計による明るさ効率の改善の努力が続けられているが、今後ますます重要になるエネルギー節減に答えられるような大幅な効率の改善が困難な状況になりつつある。

以上のように、ランプや照明器具などの照明機器の性能評価や照明設計の評価など、照明の評価では「明るさ」が重要な基準となっている。ここで、これまでの開発の場合、明るさを表わすための数量には、人間の目の分光感度をもとに定義された光度や照度、輝度などの測光量が用いられてきた。

これらの測光量のうち、輝度が、見ようとする対象物から人間の目の方向に照

射される光の量に対応することから、人間が感じる“明るさ”に近いものとして用いられている。しかし、たとえば、図1-1のように、昼間、輝度の高い窓を背景として座っている人の顔を見た場合と、同じ人を夜間の低い輝度の窓を背景として座っているときの顔の明るさを比べると、例え対象となる顔の輝度が等しくても人間が感じる“明るさ”は著しく異なることを経験する。このように、私たちが感じる明るさは様々な要因によって変化するので、輝度が等しいからといって等しい明るさに感じられるとは言えない。



図1-1 明るさが輝度と対応しない現象の例

ここで、輝度や照度などの測光量に代わる、人間の感じる“明るさ”を表わす基準が明らかにされ、それに基づいた照明設計技術が開発されれば、より人間の視知覚に対して適切な光環境を実現できるとともに、さらに、その環境を実現するために最もエネルギー効率の高い照明器具やランプの開発が可能となる。

本研究は、人間の感じる“明るさ”を数量化するブライトネスに関するものである。

1. 2 ブライトネスとは

(1) 明るさの要因

人間がある物を見たときに感じる明るさの要因には以下のものが考えられる。

- ①対象物から放射される光の分光分布
- ②対象物の色
- ③対象物を見る目の（輝度）順応の状態
- ④対象物の提示時間、または対象物への注視時間
- ⑤対象物とその背景によって起こる対比効果

これらのうち、光の分光分布については、目の分光感度をもとに照度や輝度の単位が定義されており⁽¹⁾、現在の測光量は、この要因を考慮しているといえる。ただし、現在の測光量の定義に用いられている目の分光感度（標準比視感度）は明所視での目の分光感度を代表するものであり、暗所視や薄明視では目の分光感度が明所視でのそれと異なる。したがって、現在の測光量では光の分光分布による明るさへの影響を正しく評価しているとはいえない。このため、薄明視や暗所視での目の分光感度や明るさ効率の研究、薄明視での測光システムの研究が進められている⁽²⁾。

また、対象物の色については、同じ輝度でも色づいたものの方が明るくみえる効果（ヘルムホルツ・カラーラッシュ効果）があり、対象物の色によって輝度と明るさが一致しないことが知られている。このため、標準比視感度に代わる視感度関数の研究やそれをもとにした測光システムの研究が進められている⁽³⁾。

目の順応状態については、図1-1の例で示したように、人間の目の光に対する感度は、見ているものの輝度やその周囲の輝度によって大きく変化するので、同じ輝度の対象物を見る場合でも、周囲の輝度条件などによって目の順応状態が異なると、異なった“明るさ”に感じられる。このため、“明るさ”を求めるためには、対象物の輝度だけでなく、それを見る人間の目の順応状態を考慮する必要がある。

また、輝度の高い対象物が短時間提示される場合には、提示された直後には、その明るさが急激に増加する効果（フロッカ・ザ・ルツァー効果）が知られている⁽⁴⁾。また、対象物とその背景との境界部では、両者の輝度が異なると明るさの強調や減衰が

起こるマッハ効果などが知られている⁽⁵⁾。

(2) ブライトネスの定義

以上のように、人間の”明るさ”の感覚は様々な要因によって変化する。このため、それぞれの要因に関連した人間の視覚特性の研究が進められ、それらをもとに、明るさの評価方法が研究されている。しかし、前節で述べたように、現在の照明技術では照度や輝度という測光量を明るさを表わす数量として技術開発を進めている。これらの測光量では、光の分光分布という要因は考慮しているが、他の要因は考慮していない。このため、図1-1の例で示したように、たとえば同じ輝度の対象物を見たときでも、目が高い輝度に順応している場合には暗く、低い輝度に順応している場合には明るく感じる。このように目の順応状態の差異によって明るさを正しく評価することができないという問題が起こっている。

実際に我々が生活している光環境を考えると、たとえば真昼の屋外と夜間の照明が不十分な環境では視野の輝度にして10万倍以上の差異がある。そのような大きな変化が起こるなかで我々は日常、目の順応状態を変化させてものを見ている。したがって、目の順応状態の差異による明るさの変化は日常、頻繁に生ずることから、適切な光環境を実現するためには、まず第一に目の順応状態を考慮した”明るさ”を正しく求められるようにすることが必要であった。

このような背景のもとに、従来から対象物の輝度とその対象物を見る人間の目の順応状態と対象物の”明るさ”との三者の関係が研究されてきた。この”対象物の明るさ”は「ブライトネス」と呼ばれている。本論文では、これらの研究と同様に、目の順応状態を考慮した明るさをブライトネスと呼び、その定量化と照明設計への応用を検討する。すなわち、本論文で扱うブライトネスとは、「対象物の輝度と、それを見る人間の順応状態によって決まる”明るさ”の感覚を表わす」と定義する。

1. 3 ブライトネスの応用効果

ブライトネスは目の順応状態が明るさに及ぼす影響を考慮しているため、順応

の変化が大きく、それによって明るさの変化が強く影響を受ける状況において、対象物の明るさを表わす有効な手段となると考えられる。そこで、このような条件であり、ブライトネスを導入することによって適切な視環境の実現が期待される照明の事例について述べる。

(1) オフィス照明

オフィスでは、図1-1に示した例のように、昼間の明るい窓を背にした人の顔が暗く見え、その人の表情がわからなかったり、極端な場合には顔のシルエットしかわからないことがある。このため、たとえば昼間、窓を背にした人と会話している場合、相手の表情に現われる心理的な変化を知ることができない。このことは、窓を背にしている上司が部下に指示・命令をする際にはメリットがあるときもあるが、一般にコミュニケーションを通じて相互の理解をはかるためには、お互いの顔が明るく見え、表情の変化も視認しやすい照明が必要である。また、明るい執務室から窓に接していない廊下に移動した場合、廊下の照明がJISの照度基準⁽⁶⁾を満足していても、移動した直後は廊下が暗く陰うつな環境に感じられる。これは、移動した人の目が高い輝度に順応した状態であり、廊下の低い輝度に十分に順応していないことに原因がある。

これらの問題に対して、会話する相手の顔の必要な明るさや廊下の通路の必要な明るさの条件をブライトネスを用いて求め、そのブライトネスの値を与える照明を実現することによって目の順応状態に応じた適切な照明環境が得られる。

(2) 道路トンネル照明

現在の道路トンネル照明の照明レベル（必要とされる路面の輝度）はおもに路上に落下している障害物が視認できるために必要な路面輝度をもとに定められている⁽⁷⁾。この場合、トンネルの入口付近では、昼間は、道路を走行している運転者の目が高い輝度に順応し、目の感度が低下しているため、運転者が障害物を視認できるように高い路面輝度に設定されている。これに対して夜間には運転者の目の感度が高くなるため、低い路面輝度に設定されている。このような路面輝度の制御がトンネル外部の輝度状態に応じて実施されている。

このような照明レベルの制御の結果として、障害物に対しては十分な視認性を

確保できる環境を合理的に実現している。しかし、実際にトンネルの入口付近を走行してみると、昼間、先行車がある場合、その先行車がトンネル入口に進出した瞬間、それまで明るく見えていた先行車が急激に暗くなって見えにくくなることを経験する。交通量の多い道路トンネルでは、先行車の明るさの急激な変化が後続車の運転者に不安を与え、後続の運転者がアクセルを緩めたり、場合によってはブレーキをかけるなど、後続車の速度低下を起こすことがある。その結果、これが道路トンネルの入口部での渋滞発生や追突事故の原因となることがある。このような問題に対して、ブライトネスを用いて先行車の明るさを表わし、先行車のブライトネスを一定以上に維持するような照明が実現できれば、自動車運転者の目の順応状態に応じた適切なトンネル内の照明環境が得られ、より安全で不安を軽減するトンネル照明環境が実現できると期待される。

(3) 建物のエントランス部の照明

昼間、明るい屋外から、建物の入口部、例えば大規模ビルの広いエントランスホールに入っていくとき、屋外から入口内部を見たときには内部が暗く見え、自分もホールの内部に入るとかなり明るく感じられることがある。また、逆にホールの受付デスクに座っている人が、外から入口に入ってくる人を見たとき、その人の顔や体が暗く、極端な場合、シルエットしかわからないので、来客の様子が分かりにくいという問題が起こることがある。これらの原因は、人間の目の順応状態が大きく異なることにある。すなわち、前者の例の場合、屋外からホールの内部を見ているときには、その人の目は高い輝度に順応しているので、内部が暗く見え、やがて自分もホールの内部に入ったときには、その人の目は低い輝度に順応しているので、内部が明るく見える。また、後者の例の場合には、受付にいる人が来客者を見ようとしたときに、その来客の背景の視野が屋外の高い輝度で占められて目が高い輝度に順応しているためである。

実際の照明設計では、設計技術者の経験をもとに入口付近の照度レベルを多少増加させることがあるが、適切な環境が実現できているとはいえない。これらに対してブライトネスをもとに照明条件を設定することができれば、屋外の輝度条件の変化に応じて照明レベルを制御することによって、人など対象物の一定の明るさを確保する照明環境が実現できると期待される。

(4) 屋外ディスプレイ

現在、CRTディスプレイをはじめ、液晶ディスプレイ、LEDなど様々なディスプレイデバイスが実用化されている。これらのディスプレイはOA機器の端末やテレビの受像機として事務所や家庭などの屋内で使用されるだけでなく、超大型のディスプレイとして屋外で使用されたり、また、電車の行き先表示や駅での案内表示として屋外で使用されるなど、様々な環境下で使用されている。

これらのディスプレイがその役割を果たすためには、少なくともディスプレイが必要十分な明るさを確保できることが必要である。この場合、とくに屋外でディスプレイが使用されるときには、ディスプレイを見る人間の目の順応状態がディスプレイの周囲の輝度状態によって大きく変化し、これがディスプレイの明るさに強い影響を与える。たとえば、ディスプレイの背景となる位置に昼間の天空があるような条件では、ディスプレイの輝度を十分高くする必要があるが、ディスプレイの周囲を輝度の低い背面板などで囲うことによって目の順応状態を低く抑えることができ、ディスプレイの輝度を低下させることが可能である。また、一定のディスプレイの明るさを維持するためには、天候や時刻による輝度条件の変化に応じてディスプレイの輝度を制御する必要がある。

ディスプレイの明るさをブライトネスで評価検討することによって、これらの適切な制御を実現し、適切なディスプレイの明るさを確保できることが期待される。

1. 4 従来の研究とその応用

1. 4. 1 ブライトネスの研究の歴史的経緯

ブライトネスという感覚量について最初に述べたのはFechner⁽⁸⁾の「感覚量は刺激量の対数に比例する」とする仮説と考えられる。ただし、この仮説のような感覚量であるブライトネスと刺激量である輝度との関係が成立するのは目の順応状態が、その対象物の輝度に十分に順応し、かつ対象物の輝度が高いという特定の条件の場合だけであった。このため、目の種々の順応条件に対して、輝度とブライトネスとの関係が、たとえばPitt⁽⁹⁾、Hopkinsonら⁽¹⁰⁾、Stevensら⁽¹¹⁾、

Onley⁽¹²⁾, Padghamら⁽¹³⁾, Jamsonら⁽¹⁴⁾, Hewittら⁽¹⁵⁾, Bartlsonら⁽¹⁶⁾, 小林⁽¹⁷⁾, Bodmannら⁽¹⁸⁾など多くの研究者によって実験研究されてきた。

これらのうち、代表的研究について、以下にその概要を述べる。

(1) Hopkinsonらの研究

Hopkinsonら⁽¹⁹⁾らはContrast Ladder法と呼ぶ実験手法を用いた観測実験を行ない、その結果をもとに、対象物の輝度と順応状態とブライトネスとの関係を明らかにした。Contrast Ladder法とは、ある一定の目の順応状態の観測者に、ある輝度の対象物を提示し、これを基準の明るさとする。つぎにこの対象物の輝度を増加させ、観測者が対象物の明るさの変化がやっと識別できるときの対象物の輝度を求める。つぎに求めた輝度の対象物の明るさを基準として同様の観測を繰り返し、輝度とブライトネスとの関係を求める方法である。この方法によって求められた結果を図1-2に示す。図中の順応輝度とは、観測実験のときに観測者の目の順応状態をある条件に設定するために用いた(順応用の)視野の輝度を示す。この順応輝度によって観測者の目の順応状態を数量的に表わした。

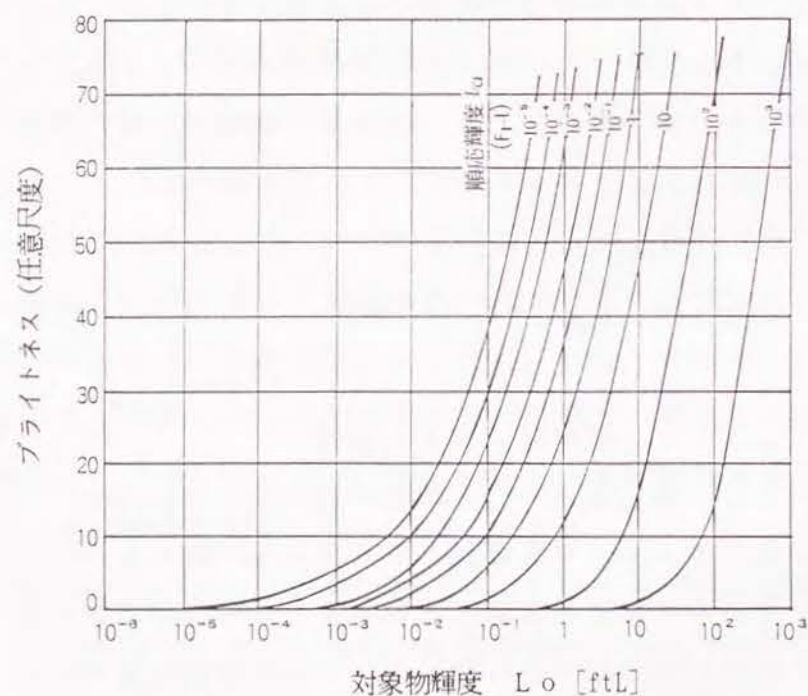


図1-2 輝度とブライトネスとの関係(Hopkinsonら)
(Contrast Ladder法の結果)

しかし、Contrast Ladder法によって得られた結果では、ブライトネスの値が大きい、すなわち明るい対象物の場合、識別閾を積み重ねてブライトネスの値を決めるため、ブライトネスの値に大きな誤差があることが明らかになった。このため、Hopkinson⁽¹⁹⁾は、観測者に対象物の明るさの程度を直接、数値で評価させる直接評価法を用いて、対象物の輝度と順応状態とブライトネスとの関係を求めた。その結果を図1-3に示す。

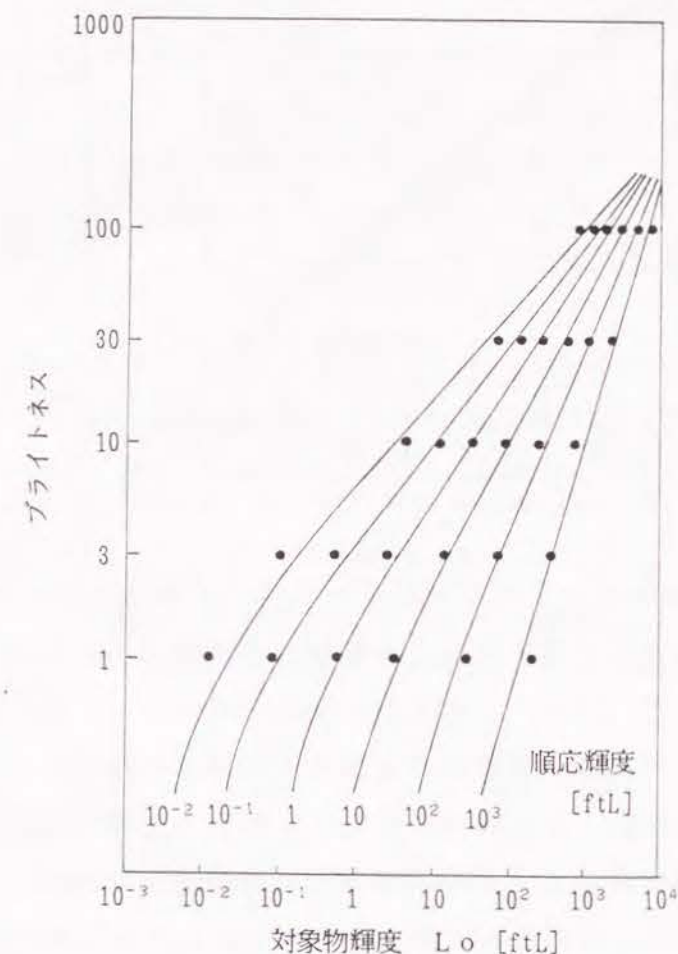


図1-3 輝度とブライトネスとの関係(Hopkinsonら)
(直接評価法の結果)

Hopkinson⁽²⁰⁾は、さらにこれらの実験結果を、実際の事務所照明でのブライトネスの評価結果との比較をもとに修正し、図1-4および式(1-1)に示す対象物輝度と順応状態とブライトネスとの関係を明らかにした。

$$\log M = 3.19 + (\log L_o - 5.44) / (1.68 - 0.22 \log L_a) \quad \dots (1-1)$$

ここで、 $\log M$: ブライトネス

L_o : 対象物輝度 [ftL]

L_a : 順応輝度 [ftL]

である。

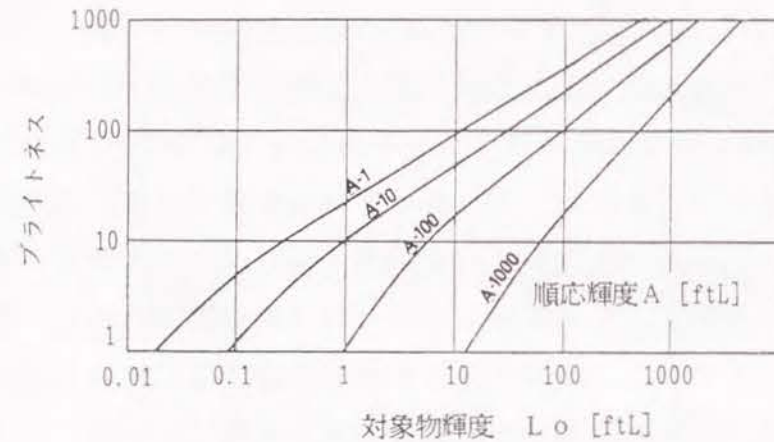


図1-4 輝度とブライトネスとの関係(Hopkinsonら)

(2) Stevensらの研究

Stevensら⁽¹¹⁾は、観測者に左右の両眼のそれぞれに提示された対象物の明るさマッチングさせる両眼明るさ調整法による実験と直接評価法による実験を行ない、対象物の輝度と順応状態、ブライトネスとの関係を明らかにした。両眼明るさ調整法の実験では、具体的には、観測者の右眼をある輝度に設定した均一視野に順応させ、その視野の中心に、ある輝度に設定した対象物を提示する。もう一方の左眼はほぼ暗黒の視野に順応させ、その中心に短時間対象物を提示する。観測者に左右のそれぞれの視野に提示された対象物の明るさが等しく感じられるように、左眼の対象物の輝度を調整させた。

これらの実験結果から、図1-5に示す関係を明らかにした。

また、次式に示す関数式を明らかにした。

$$\phi = k (L - L_{th})^\beta \quad \dots (1-2)$$

ここで、 ϕ : ブライトネス

L : 対象物輝度

L_{th} : 輝度弁別閾

k, β : 目の順応状態によって決まる定数

であり、 L_{th}, k, β はいずれも順応状態の関数として定められている。

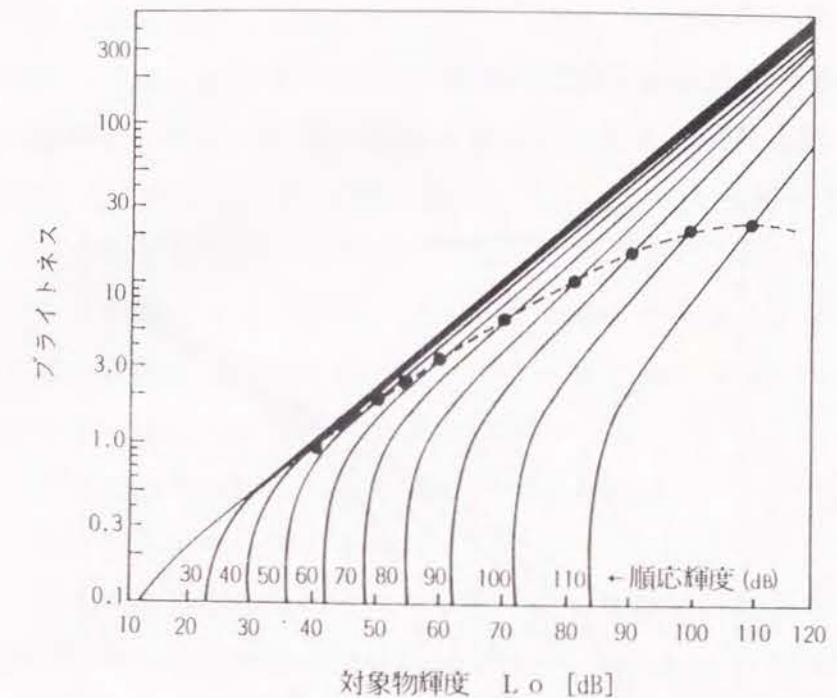


図1-5 輝度とブライトネスとの関係(Stevensら)
(破線は対象物輝度と順応輝度とが等しい場合)

(3) Bodmannらの研究

Bodmannら⁽¹²⁾は、半球状の均一輝度の視野を観測者に提示し、その視野に観測者の目を順応させ、その視野の中心に対象物を提示して、観測者に対象物のブライトネスを直接評価法によって求めさせる実験と、同様にして観測者の目を順応させ、その中央に二つの異なる明るさの対象物を提示し、観測者にそれらのちょうど昼間の明るさと感じられる対象物の輝度を求めさせる二分法による実験を行った。

その結果から図1-6および次式に示す対象物輝度と順応状態とブライトネスとの関係を明らかにした。

$$B = C_T(\phi) L_T^n - B_a(L_u, \phi) \quad \dots (1-3)$$

ここで、 $n = 0.31 \pm 0.03$

$$B_a(L_u, \phi) = C_T(\phi) [S_a(\phi) + S_i(\phi) L_u^n]$$

L_T : 対象物輝度

L_u : 順応輝度

ϕ : 対象物の視角寸法(分)

$C_T(\phi)$, $S_a(\phi)$, $S_i(\phi)$ はそれぞれ ϕ によって決まる定数

である。

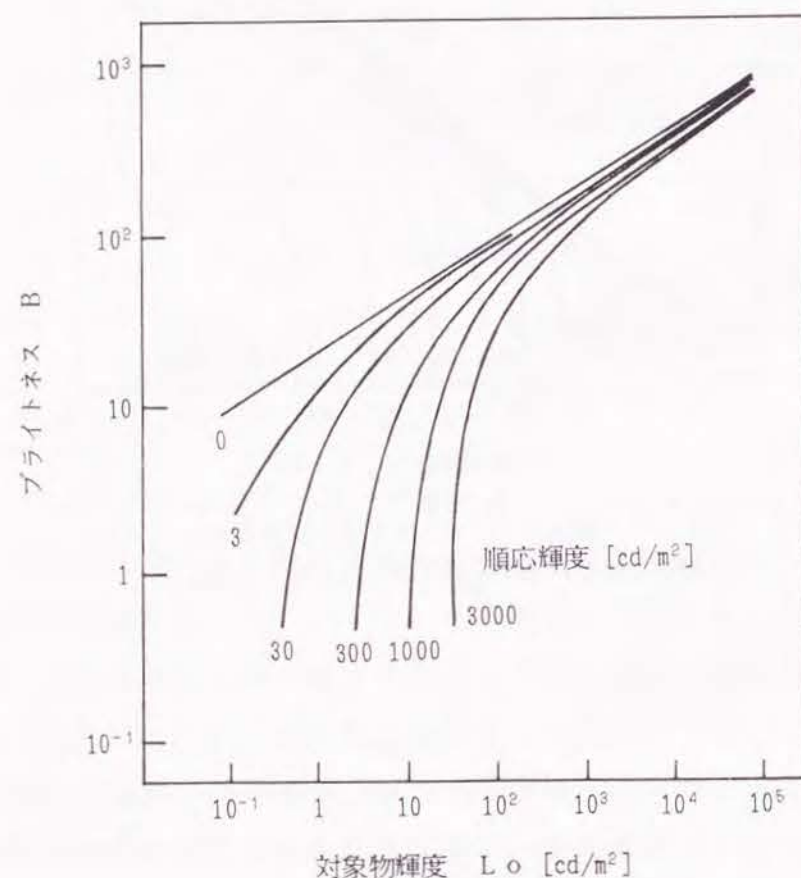


図1-6 輝度とブライトネスとの関係(Bodmannら)

1. 4. 2 ブライトネスの応用の試みとその課題

Hopkinson⁽²¹⁾はブライトネスの研究成果を事務所照明に応用する目的で、実際の事務所照明環境において、対象となる机上面や壁面などの必要なブライトネスの検討や、ブライトネスの評価を行なった。また、Waldram⁽²²⁾は建築物の内部の

明るさをブライトネスによって設定したり、成定ら⁽²³⁾は道路照明の所要路面輝度の実験結果を解析し、道路照明では、障害物と路面との間に一定以上のブライトネスの差を確保することが重要であることを示した。しかし、これらの応用の試みは、その後ほとんど行なわれず、ブライトネスの研究が照明技術に十分に応用されているとはいえなかった。

国際照明委員会では、ブライトネスの研究を照明技術に活用できるようにするため、その活動の一つとして、専門技術委員会を設立して検討を進めた。その結果、CIEウィーン大会において、照明設計にブライトネスを活用するための課題として以下のことが報告された⁽²⁴⁾。

- (1) 異なった実験手法で得られたブライトネスの研究結果の比較
- (2) ブライトネスの客観的測定を可能とするための検討方法
- (3) 対象物の大きさによるブライトネスの変化
- (4) 不均一な輝度分布の視野でのブライトネスの評価
- (5) 有彩色物体に対するブライトネス

その後、ブライトネスの応用についてはCIEの検討項目にあげられてきたが、ブライトネスに関する研究動向の調査にとどまっていた。この間に、ブライトネスの研究結果の比較は小林⁽¹⁷⁾や、神部ら⁽²⁵⁾などによって検討され、また、Bodmannら⁽¹⁸⁾は異なる実験手法で得られた結果がよく一致することを実験的に明らかにした。しかし、ブライトネスの応用に関する研究や照明設計への応用はほとんど進められなかった。

この主な原因は、二つが考えられる。まず第一は、実際の複雑な輝度分布の視野に対する順応状態を正確に求める方法がなかったことである。この課題は前述のCIEの委員会でも指摘された課題である。

従来のブライトネスの実験研究では、観測者の目の順応状態を設定するために、ある視野範囲の輝度が均一な比較的単純な視野に観測者の目を順応させ、その状態の目に対象物を提示し、対象物のブライトネスを求め、対象物の輝度と目の順応状態とブライトネスとの関係を求めていた。これに対して、実際の視環境での人間の視野は輝度分布が複雑である。このため、従来の研究結果を応用しようとした場合、実際の複雑な視野に順応している人の目の順応状態が、実験で用いられた視野のどの輝度に順応しているときと同じ順応状態であるかを知る必要があ

る。しかし、実際の複雑な輝度分布の視野に対する順応状態を正確に求める方法がなかったため、ブライトネスを応用しようとする視野での順応状態を求められなかった。

第二の原因には、従来の研究で示されたブライトネスの尺度が実用的でなく、使用しにくかったことである。

従来のブライトネスの研究で用いられたブライトネスの尺度は、それぞれの実験で観測者に提示された視野の条件に対して定められており、たとえば、照明設計の際に、あるブライトネスの値のときの明るさの程度を実際に見て確かめようとする、その実験に用いられた視野条件を再現して見る必要がある。しかし、たとえばBodmannら⁽¹⁸⁾のブライトネスの尺度を見てみようとする、実際に半球状の均一視野を実現する必要があるが、このような視野条件を再現することは容易ではない。このため、照明設計技術者がブライトネスを応用しようとしたときに、ブライトネスの値が示す明るさの程度を容易に確認することが困難であった。

本論文は、以上の二つの課題の解決をはかり、ブライトネスを照明設計に応用するための研究に関するものである。以下の第2章では、前述の一つの課題である複雑な輝度分布の視野に対する順応状態を求める方法に関する研究を述べる。第3章では、もう一つの課題である実用的なブライトネスの尺度と、それをもとに求めたブライトネスの定量化式に関する研究を述べる。また第4章ではブライトネスの客観的な計測方法と測定例について述べる。第5章では、ブライトネスの照明設計の応用例とその効果について述べ、第6章では本論文の結論について述べる。

[参考文献]

- (1)Publication CIE No.18 : The basis of physical photometry. (1970)
- (2)Publication CIE No.81 : Mesopic photometry: History, special problems, and practical solutions. (1989)

- (3)Publication CIE No.75 : Spectral luminous functions based upon heterochromatic brightness matching for monochromatic point sources, 2° and 10° fields. (1988)
- (4)Broca A., Sulzer D.: La sensation lumineuse en fonction du temps. J. Physiol. Path. Gen., Vol.4 (1902) 632-640
- (5)Mach E.: The analysis of sensations and the relations of physical to the physical. Chicago: Open Court Publishing (1914)
- (6)JIS Z9110 : 照度基準 (1979)
- (7)(財) 高速道路調査会: トンネル照明設計指針 (平成2年)
- (8)Fechner G.: Elemente der Psychophysik. Bd. I und II. Leipzig: Breikopf Hartel (1907)
- (9)Pitt F. G. H.: The effect of adaptation and contrast on apparent brightness. Proceedings Phys. Soc. London Vol.51 (1939) 817-830
- (10)Hopkinson R.G., Waldram J.M., Stevens W.R.: Brightness and contrast in illuminating engineering. Trans. Illum. Engng. Soc. (London) Vol.6 (1941) 37-47
- (11)Stevens J.C., Stevens S.S.: Brightness function: effects of adaptation. J. Opt. Soc. Amer. Vol.53 (1963) 375-385
- (12)Onley J.W.: Light adaptation and the brightness of brief foveal stimuli. J. Opt. Soc. Amer. Vol.51 (1961) 667-673
- (13)Padgham C.A., Saunders J.E.: Scale of apparent brightness. Trans. Illum. Engng. Soc. (London) Vol.31 (1966) 122-142
- (14)Jamson D., Hurvich L.M.: Complexities of perceived brightness. Science, Vol.133 (1961) 174-179
- (15)Hewitt H., Kay J., Longmore J.: Designing for quality in lighting. Trans. Illum. Engng. Soc. (London) Vol.32 (1967) 63-89
- (16)Bartlson C.J., Breneman E.J.: Brightness perception in complex fields. J. Opt. Soc. Amer. Vol.57 (1967) 953-957
- (17)小林朝人: 明るさの知覚尺度 -Apparent brightness scales-. 日本建築学会論文報告集 第178号 (昭和42年) 83-92

- (18) Bodmann H.W., Haubner P., Marsden A.M.: A unified relationship between brightness and luminance. Proceedings of CIE Kyoto, CIE Pub. No. 50 (1980) 99-102
- (19) Hopkinson R.G.: Adaptation and scales of brightness. Proceedings CIE 14th Session Brussels (1959) 289-297
- (20) Hopkinson R.G.: A proposed luminance basis for a lighting code. Trans. Illum. Engng. Soc. (London) Vol. 30 (1965) 63-88
- (21) Hopkinson R.G.: Assessment of brightness - what we see. Illum. Engng. Vol. 52 (1957) 211-222
- (22) Waldram J.M.: Studies in interior lighting. Trans. Illum. Engng. Soc. (London) Vol. 19 (1954) 95-133
- (23) 成定康平、後藤唯男、田辺吉徳: 道路照明に於ける輝度分布について. 昭和41年度電気四学会連合大会予稿集 637
- (24) Publication CIE No. 11B (1963) 216-218
- (25) 神部尚武: 明るさ感覚量のスケールと実験条件. 昭和42電気四学会関西支部連合大会 (1967) No. 12-1

第2章 複雑な視野に対する順応に関する計測

2. 1 順応状態の定量化の考え方

第1章で述べたように、目の順応状態はブライトネスの主要な要因の一つである。従来のブライトネスに関する研究における実験では、多くの場合、観測者の目の順応状態を設定するために、十分に大きな視角寸法をもち、輝度分布が均一な視野を用意し、その視野に観測者の目を十分に順応させた。その場合、観測者の目の順応状態を定量的に表わす手段として、順応に用いた視野の輝度を用い、その輝度を「順応輝度」と呼んでいる。このように定義された順応輝度と対象物の輝度との関数としてブライトネスが定量化されていた。同様の順応状態の定義方法が、他の種々の視覚機能、たとえば視力や輝度弁別力などの特性の研究でも用いられた。

しかし、このように定義された「順応輝度」の値が等しい場合でも、順応に用いた視野の大きさや輝度分布が異なると、閾値が異なることがある。また対象物の明るさ、すなわちブライトネスも、その対象物の背景の大きさや輝度分布によって変化する。したがって、実験に用いた視野の輝度だけで目の順応状態を正確に表わすことはできない。実験に用いた視野の輝度で目の順応状態を代表させることができるのは、その視野と同じ輝度分布の条件の視野に目が順応している場合だけである。しかし、実際の視環境では、輝度分布は均一ではなく、前述の実験で用いられたような特定の輝度分布であることはほとんどない。このため、実際の視環境に対する目の順応状態を視野内の輝度分布から直接に求めることは不可能であった。

目の順応に関して、Holladay⁽²⁶⁾は、周辺視野内に点光源があるときの目の順応状態は、そのときの中心視での輝度差弁別閾と等しい輝度差弁別閾となる均一な背景輝度に置き換えられるという考えを報告した。また、Crawford⁽²⁷⁾は、暗順応過程での目の順応状態を、そのときの輝度弁別閾と等しい輝度弁別閾を生ずる均一な背景輝度で表わす方法を明らかにした。これらから、ある視野に順応し

ているときの目の順応状態は、その視野に順応したときの視覚閾値と等しい視覚閾値を生ずる均一な視野の輝度で数量的に表わし、その輝度を「順応輝度」と定義することが合理的と考えられる。

この場合、視覚閾値として、どのような視覚特性の閾値を用いるかが問題である。ブライトネスの研究では、一つの実験手法としてContrast Ladder法や閾値増分法が用いられ、それらの手法による観測結果をもとに、ブライトネスの定量化式が求められている。Contrast Ladder法や閾値増分法では、基準とする対象物の明るさと比べて明るさの差が知覚できるための対象物の輝度の増減分を求める方法である。このため、ブライトネスの要因である目の順応状態を定量化するための視覚閾値としては、中心視での輝度の弁別に対する閾値である輝度差弁別閾が適切と考えられる。したがって、本論文では中心視での輝度差弁別閾を順応輝度、すなわち、目の順応状態を定量化するための媒体となる視覚閾値として用いることとした。

2. 2 輝度差弁別閾と視野輝度に関する研究

2. 2. 1 輝度差弁別閾の要因

輝度差弁別閾の研究としては、輝度差弁別閾 ΔL_{min} とその背景の輝度 L との比($\Delta L_{min}/L$)が一定であるというWeberの法則が古くから知られている。その後、たとえばBlackwell⁽²⁸⁾、Stiles⁽²⁹⁾、野口ら⁽³⁰⁾など多くの研究者によって、さまざまな視角寸法や提示時間の視標や、背景の輝度に対して輝度差弁別閾や輝度対比弁別閾が求められた。また、照明設計への応用的な研究として、Schreuder⁽³¹⁾によって、トンネル入口照明境界部の所要路面輝度を明らかにする目的で、観測者が順応する均一視野の輝度と輝度差弁別閾との関係が明らかにされた。これらから、均一な背景輝度に対して、背景輝度と輝度差弁別閾や輝度対比弁別閾との関係が明らかにされている。図2-1は、Blackwellら⁽²⁸⁾が多くの観測者を用いた実験結果をもとに求めた背景輝度と輝度対比弁別閾との関係を示す。この関係は標準的な人間の特性として、国際照明委員会から一つの基本関数として推奨されている。また、たとえばCrawford⁽²⁷⁾によって暗順応時の輝度差

弁別閾が、さらにHolladay⁽²⁶⁾をはじめ、多くの研究者によって周辺視野にグレア光源が存在するときの輝度差弁別閾が求められた。

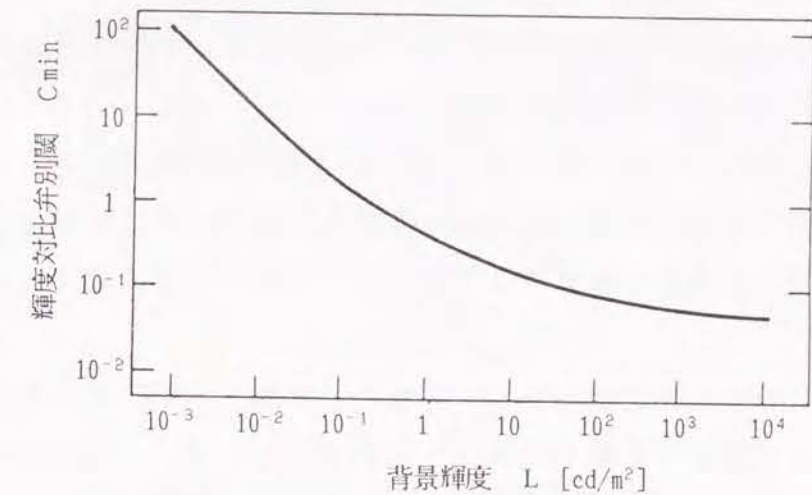


図2-1 背景輝度と輝度対比弁別閾との関係

これらの研究結果から、輝度差弁別閾の要因としては以下の要因が考えられる。

- 1) 輝度差弁別閾を求めるために提示する視標の大きさ
- 2) 視標の提示時間
- 3) 視標に隣接する背景の輝度
- 4) 網膜の中心窩の順応状態
- 5) 視標を取り囲む周辺視野の輝度分布

これらのうち、1)と2)と3)は輝度差弁別閾を求めるときの視標の物理的な要因であり、4)と5)は観測者の視野の状態に関係し、その視野に順応したときの目の順応状態と密接な関係のある要因である。

したがって、ある視野に順応したときの目の順応状態を定量化するための輝度差弁別閾を検討する場合には、4)と5)の要因と輝度差弁別閾との関係を検討することが必要である。このためには、他の要因は一定とすることが必要である。ただし、視標の背景輝度は、輝度差弁別閾を求めるときに視標とその背景の輝度差を種々に変化させて提示する必要がある。今回の研究では、視標の大きさを視角寸法で1辺が10分の正方形、提示時間を1/8秒とし、これらの条件を一定として順応と関係する他の要因、すなわち4)と5)の要因と輝度差弁別閾との

関係を検討することとした。

2. 2. 2 中心窩が順応している輝度と輝度差弁別閾との関係に関する実験

網膜の中心窩の順応状態が輝度差弁別閾に及ぼす影響を検討するためには、中心窩が順応している輝度と輝度差弁別閾との関係を明らかにすることが必要である。この関係としては、従来から暗順応過程での輝度弁別閾が求められており、このなかで前順応と暗順応初期の光覚閾との関係が報告されている⁽³²⁾。しかし、これらの実験結果は前順応と光覚閾との関係のデータとしては必ずしも十分とはいえない。

また、中心窩が輝度差弁別閾に及ぼす影響と、次節で示す、周辺視野の輝度分布が輝度差弁別閾に及ぼす影響との関係を検討するためには、両者の影響それぞれを調べるときの視標の大きさや提示時間などの物理的な要因は統一することが必要である。このため、前述の視標の大きさと提示時間の条件で、中心窩が順応している輝度（以後、中心窩順応輝度と呼ぶ）と輝度差弁別閾との関係を実験によって求めた⁽³³⁾。

(1) 実験方法

実験は、観測者に、ある輝度に設定した視野を注視させ、その輝度に中心窩を十分に順応させた後、観測者の中心視野に視標とその背景を短時間提示した。この観測を繰り返し、その結果から、視標が50%の確率で視認できるための視標とその背景の輝度差を求め、それを輝度差弁別閾として求めた。

図2-2に実験装置の概要を示す。観測者はハーフミラーの背後に設置された視標提示装置によって提示された視標とその背景を観測する。ハーフミラーには、光源ボックスBによって作られる円形（直径が視角寸法 3° ）の均一面光源Pが投影される。視標提示装置は、直径 1.3° の円形の均一背景に対して、一辺が視角10分の正方形の視標が $1/8$ 秒間提示できる。視標とその背景の輝度対比（背景輝度>視標輝度）は0.17~0.98の5条件とした。観測者は正常な視覚を有する男性3名とした。

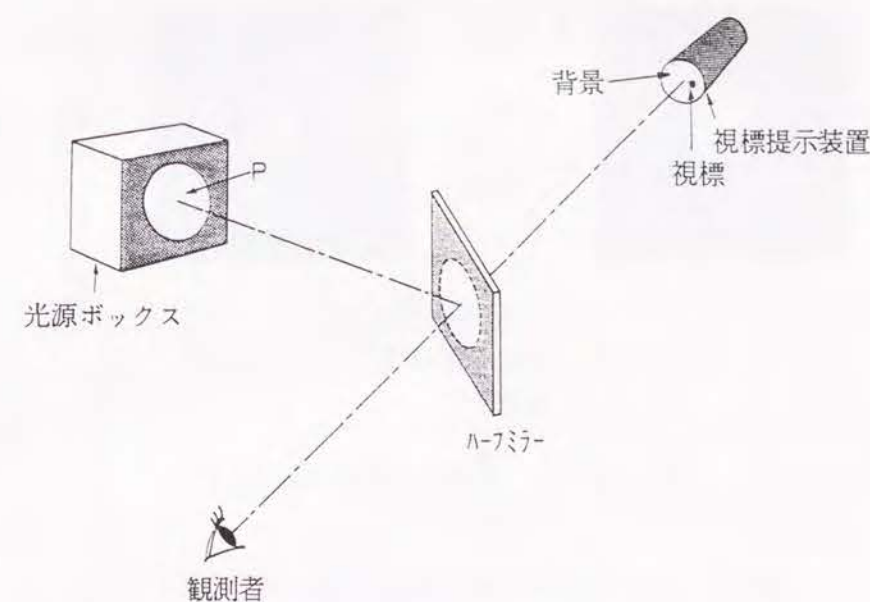
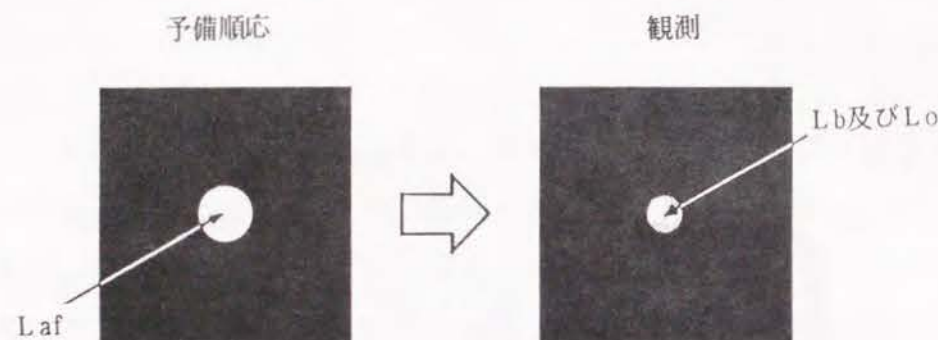


図2-2 実験装置の概要

観測者は、ほぼ暗黒な視野に十分暗順応した後、ハーフミラーに投影された面光源の中心を注視し、その輝度に5分間順応（予備順応）する。これによって観測者の中心窩順応輝度を、ある輝度の条件に設定した。次に面光源の輝度をゼロとし、その約 $1/2$ 秒後に、視標提示装置によって視標とその背景輝度とを $1/8$ 秒間提示する。視標の提示後、約 $1/2$ 秒後に面光源の輝度を元の輝度に戻し、その視野に観測者を順応させる。図2-3に予備順応時と視標提示時の観測者の視野を示す。また、図2-4に順応光と視標など刺激の時間的な関係を示す。

視標とその背景との輝度対比は一定とし、背景輝度を種々変化させ、視標とその背景との輝度差を変化させた。観測は、実験者が設定した一つの背景輝度の条件に対して観測を繰り返す恒常刺激法を用いた。観測者は視標を視認できたか否かを回答し、その回答結果から、視標を50%の確率で視認できるための、視標とその背景の輝度差を求め、それを輝度差弁別閾とした。

このような観測と解析を、中心窩順応輝度を種々に変化させた条件で繰り返した。



Laf: 中心窩順応輝度
Lb: 視標の背景輝度
Lo: 視標輝度

図2-3 観測者の視野

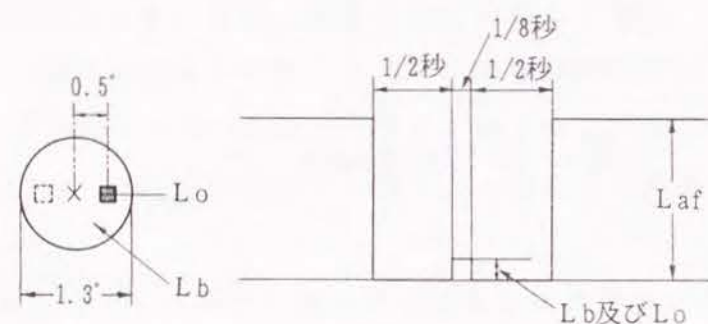


図2-4 刺激の提示タイミング

(2) 実験結果

図2-5に実験結果を示す。図の横軸は中心窩順応輝度、縦軸は輝度差弁別閾である。図にプロットした各データは3名の観測者の観測者の結果の平均値である。各点のシンボルは用いた視標とその背景の輝度対比の条件を示す。図から実験に用いた視標の輝度対比によらず、中心窩順応輝度と輝度差弁別閾とは一定の関係となることが明らかになった。また、この結果で、視標とその背景の輝度差がちょうど輝度差弁別閾となるときの背景輝度と中心窩順応輝度との値を比較すると、背景輝度に比べて中心窩順応輝度が十分大きいことがいえる。このことから視標を提示するときの背景輝度が輝度差弁別閾に与える影響を無視できるようにするためには、輝度対比の大きい視標を用いる必要があるといえる。このため、以後の実験では、背景との輝度対比が0.8の視標を用いることとした。

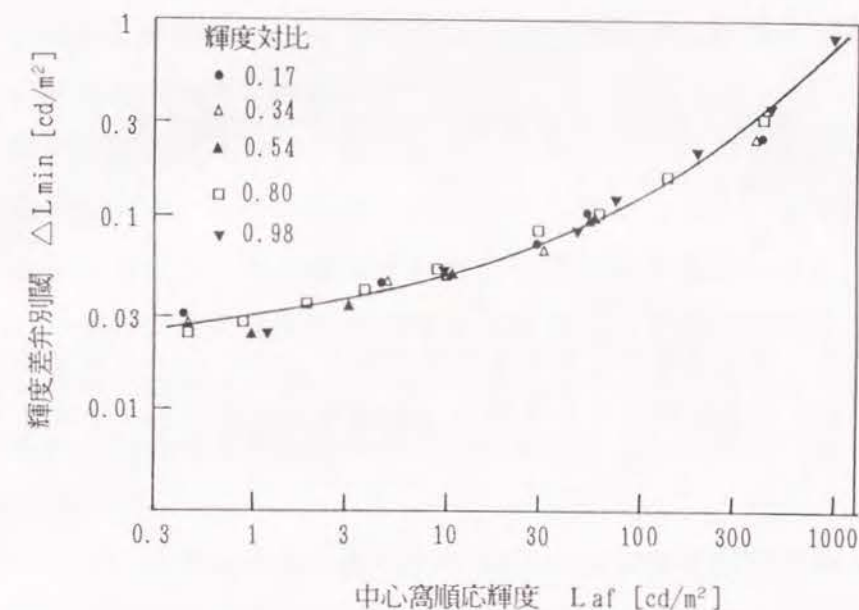


図2-5 中心窩順応輝度と輝度差弁別閾との関係

2. 2. 3 周辺視野の輝度分布と輝度差弁別閾との関係に関する実験

周辺視野内に輝度の高い光源があると、その光源から目に入射した光が眼球内で散乱し、その散乱光によって、中心視での物の視認性を低下させる現象が起こる。この現象は減能グレアと呼ばれている。この減能グレアを定量的に扱う方法として、Holladay⁽²⁶⁾は、周辺視野にある一つの光源が輝度差弁別閾に与える影響を、その光源の存在によって増加した輝度差弁別閾と等しい輝度差弁別閾の増加を生ずる光幕の輝度で表わす方法を明らかにした。この光幕の輝度は「等価光幕輝度」と呼ばれ、次式の関数として求められることを明らかにした。

$$L_{eq} = K E \cos \theta / \theta^2 \quad \dots (2-1)$$

ここで、E: 観測者の目の角膜照度

θ : 視線と光源のなす角度

K: 定数

である。

さらに、Crawford⁽³⁴⁾は周辺視野内に複数個の光源が存在する場合の等価光幕輝度が次式のように、個々の光源による等価光幕輝度の加算によって求められることを明らかにした。

$$L_{eq} = K \sum_i E_i \cos \theta_i / \theta_i^2 \quad \cdots (2-2)$$

ここで、 E_i : 光源 i によって観測者の目に生ずる角膜照度

θ_i : 視線と光源 i のなす角度

K : 定数

である。

Moonら⁽³⁵⁾は、等価光幕輝度には加法性があることから、上式を拡張し、任意の輝度分布をもつ周辺視野に対する等価光幕輝度が次式によって求められることを示した。

$$L_{eq} = K \iint L(\theta, \phi) \sin \theta \cos \theta / (\theta^2) d\theta d\phi \quad \cdots (2-3)$$

ここで、 $L(\theta, \phi)$: 観測者の視野の輝度分布

θ : 視線と光源のなす角度

ϕ : 視線に対する光源の円周方向の角度

K : 定数

である。

これらの関数形式は、減能グレアの定量化式として注目され、Stilesら⁽³⁶⁾、Fry⁽³⁷⁾、Vosら⁽³⁸⁾、Boyntonら⁽³⁹⁾など多くの研究者によって詳細な実験が行なわれ、関数形式とくに減能グレアの角度特性や定数 K の値などが研究された。また、Fryら⁽⁴⁰⁾は彼らの実験結果をもとに減能グレアを測定するための特殊なレンズ系を開発した。

その後、減能グレアについては、視線中心の近傍での特性や年齢効果などの特性が明らかにされている⁽⁴¹⁾。また、野口ら⁽³⁸⁾は、眼球内での光散乱は、周辺視野の光源に対してだけでなく、視線中心とその近傍の視野からの光に対しても生ずると考え、光の散乱を考慮した中心窩での実効的な輝度と輝度差を求める方法を明らかにした。

以上の研究によって、周辺視野の輝度分布と輝度差弁別閾との関係は、等価光幕輝度と輝度差弁別閾との関係として多くの結果が報告されている。しかし、ここでこれらの実験の条件を考えると、与えられた周辺視野の輝度によって生じた眼球内の散乱光や（等価）光幕輝度に、観測者の中心窩が十分に順応した条

件で求められた輝度差弁別閾であるといえる。すなわち中心窩順応輝度が等価光幕輝度と等しい条件での輝度差弁別閾である。

いっぽう、実際の視環境での目の順応状態を考えると、人間は視野内のさまざまな対象物に視線を向け、その中心窩はさまざまな輝度に順応しようとする。このため、実際の視環境では、中心窩順応輝度と等価光幕輝度とが等しくなる条件はほとんどない。したがって中心窩順応輝度と等価光幕輝度とが異なる条件での輝度差弁別閾を求める必要がある。このためには、中心窩順応輝度が輝度差弁別閾に与える影響と、等価光幕輝度が輝度差弁別閾に与える影響とを分離して扱えることが必要である。

これに関して、中心窩順応輝度の変化が中心窩の視細胞の光化学的反応に起因しているため、視野の輝度の変化に対して時間遅れを生ずるのに比べ、眼球内での光散乱の変化は視野の輝度の変化に対して瞬時に変化することに着目した。この二種類の変化の時間的な差を利用して、中心窩順応輝度が輝度差弁別閾に与える影響と、等価光幕輝度が輝度差弁別閾に与える影響を分離して求めるための実験を行なった⁽⁴²⁾⁽⁴³⁾。

(1) 実験方法

実験装置は、前節の中心窩順応輝度と輝度差弁別閾との関係を求めるための実験と同様の装置を用いた。すなわち図2-2のように、観測者はハーフミラーの背後に設置された視標提示装置によって提示された視標とその背景を観測する。ハーフミラーには、光源ボックスBによって作られる円形（直径が視角寸法3°）の均一面光源が投影される。視標の大きさと提示時間の条件は前節の実験と同じであるが、視標には、背景との輝度対比が0.8のものをを用いた。また観測者には視覚が正常な3名の男性を用いた。これらの実験装置、観測者を用いて次の二種類の実験を行なった。

(実験1)

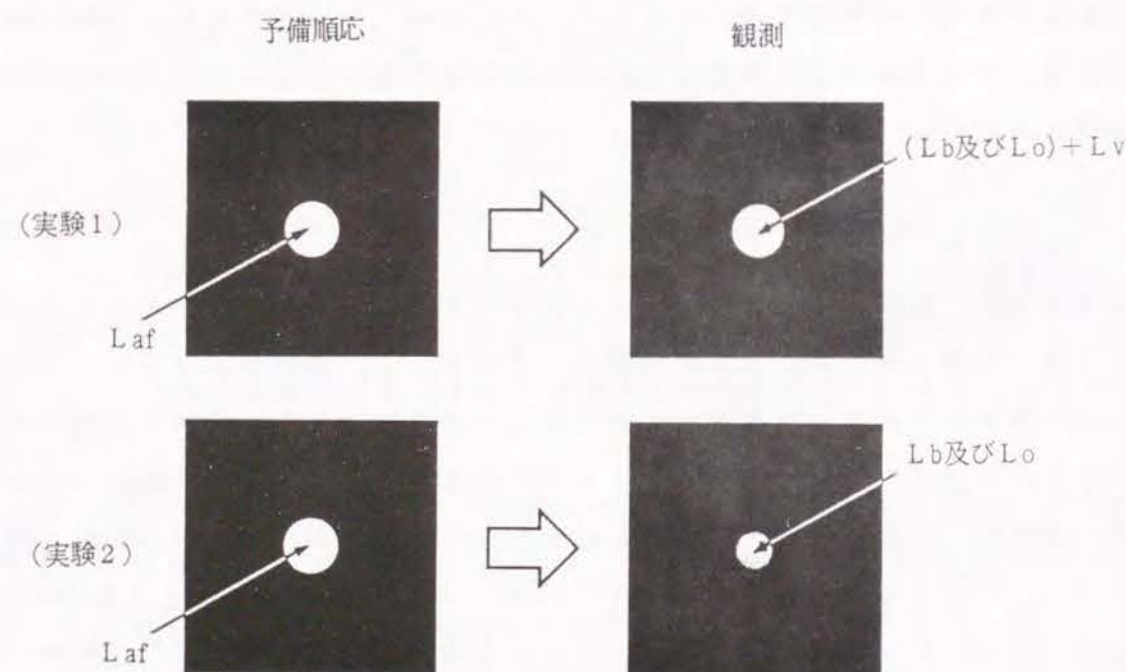
中心窩順応輝度と等価光幕輝度とが等しい条件での輝度差弁別閾を求める実験
(実験2)

中心窩順応輝度だけの影響で決まる輝度差弁別閾を求める実験

実験2は、前節(2.2.2節)の実験と同じである。

図2-6に実験1と2での予備順応および視標提示時の観測者の視野条件を示す。実験1では、観測者は、ほぼ暗黒な視野に十分暗順応した後、ハーフミラーに投影された面光源の中心を注視し、その輝度に5分間予備順応する。これによって観測者の中心窩順応輝度を、ある輝度の条件に設定した。次に面光源の輝度をそのままの状態として、ハーフミラーの背後に設置された視標提示装置によって視標とその背景輝度とを1/8秒間提示する。観測者に視標が視認できたか否かを回答させる。この観測を、背景輝度を種々変化させて繰り返し、その回答結果から、視標を50%の確率で視認できるための、視標とその背景の輝度差を求め、それを輝度差弁別閾とした。

実験2では、前節で述べた実験と同様の手順で観測を繰り返し、輝度差弁別閾を求めた。すなわち、視標とその背景が提示される間は、ハーフミラーを介して提示される光幕の輝度がほぼゼロの条件で輝度差弁別閾を求めた。



L_{af} : 中心窩順応輝度
 L_b : 視標の背景輝度
 L_o : 視標輝度
 L_v : 光幕輝度

図2-6 観測者の視野

(2) 実験結果

図2-7に実験1と2の結果を示す。図の曲線Aは実験1の結果を示し、曲線Bは実験2の結果を示す。図中の各プロット点は3名の観測者の結果を示す。ここで、実験1の実験では、視標とその背景がハーフミラーによって与えられたある輝度の光幕を通して提示されるので、得られた輝度差弁別閾には中心窩順応輝度による影響と光幕輝度の影響との両方の影響を受けた値であると考えられる。これに対して実験2の実験では、視標とその背景が提示されときの光幕輝度はゼロであるので、得られた輝度差弁別閾は中心窩順応輝度だけの影響によって決まる輝度差弁別閾であるといえる。したがって曲線Aと曲線Bとの差は、光幕輝度の影響によって決まる輝度差弁別閾と考えることができる。

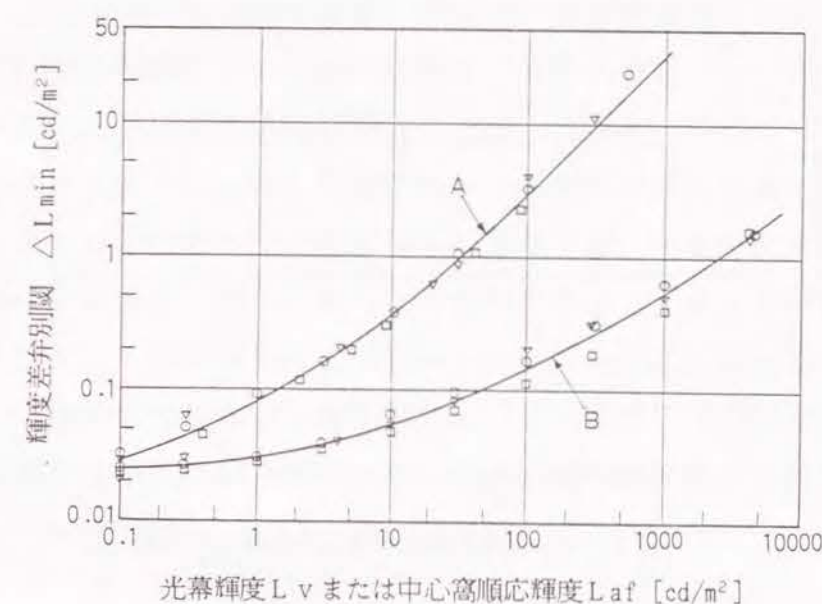


図2-7 視野輝度と輝度差弁別閾との関係

そこで、図2-7の横軸の種々の値に対して、曲線Aと曲線Bで示されるそれぞれの輝度差弁別閾の値の差を求め、曲線Aが示す輝度差弁別閾の結果から中心窩順応輝度による影響分を取り除き、光幕輝度だけの影響分を求めた。すなわち、光幕として視標とその背景に重畳し、それらの輝度を増加させることによる輝度差弁別閾の増加分であり、これは等価光幕輝度の定義から、周辺視野の輝度によって眼球内に生じた散乱光が視標と背景に重畳することによる増加分と考えるこ

とができる。解析結果を図2-8に示す。この図の曲線Cから中心窩順応輝度による影響分を除いた光幕輝度による輝度差弁別閾の影響分は、光幕輝度と比例に近い関係があり、物理量的な関係であると考えられる。または曲線Cの関係は二つの閾値の差から求めており、この関係そのものは一般の視覚閾値とは異なる性格のものと考えられる。このため、図2-8に示す関係は、従来の研究結果と区別するため、以後、(等価)光幕輝度とそれによる輝度差弁別閾の成分の関係と呼ぶ。

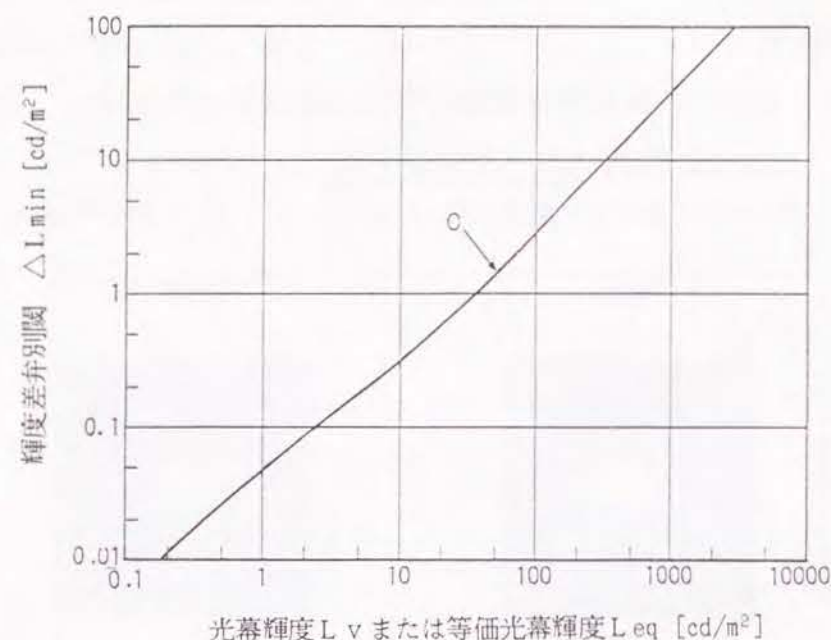


図2-8 光幕輝度と輝度差弁別閾との関係

以上の実験から、等価光幕輝度が視標と背景を増加させる影響を、中心窩順応輝度が輝度差弁別閾に与える影響から分離して求められた。ここで、周辺視野の輝度分布と等価光幕輝度との関係は従来の研究によって明らかであることから、任意の輝度分布の周辺視野による輝度差弁別閾(の成分)を求めることが可能となった。

2. 2. 4 複雑な視野での輝度差弁別閾に関する実験

2. 2. 2節および2. 2. 3節の実験により、中心窩順応輝度による輝度差弁別閾への影響と、等価光幕輝度による輝度差弁別閾への影響が明らかになった。したがって、実際の視環境のように複雑な輝度分布の視野において、中心窩順応輝度と等価光幕輝度とがそれぞれ輝度差弁別閾に対して、どのように寄与するかが明らかになれば、複雑な視野に対する輝度差弁別閾を求めることが可能となる。

ここで、等価光幕輝度による輝度差弁別閾の成分は、等価光幕輝度と中心窩順応輝度とが等しい条件での輝度差弁別閾の値から、中心窩順応輝度による輝度差弁別閾を差し引いて求めたものであることから、中心窩順応輝度による輝度差弁別閾と等価光幕輝度による輝度差弁別閾の成分との間には加法性があると仮説を立てた。もし、この仮説が成立すると、任意の複雑な輝度分布の視野に対する輝度差弁別閾は、その視野での中心窩順応輝度と等価光幕輝度とが求められれば、それぞれに対応する輝度差弁別閾の和として求められる(44)(45)(46)(47)。

この仮説を検証するためには、観測者の中心窩順応輝度と等価光幕輝度とが異なるような任意の視野に対して、実際にその視野を用いた観測実験から求めた輝度差弁別閾と、その視野に対する中心窩順応輝度によって決まる輝度差弁別閾と等価光幕輝度によって決まる輝度差弁別閾の成分とを加算して求めた輝度差弁別閾とが等しいことを明らかにする必要がある。このため、中心窩順応輝度と等価光幕輝度とが異なる条件に対して、実際の観測によって輝度差弁別閾を求める実験を行なった(48)(49)。

(1) 実験方法

上述の仮説を検討するために、以下の3種類の実験を行なった。

(実験1)

観測者の中心窩順応輝度と等価光幕輝度とが等しい視野条件に対する輝度差弁別閾を求める実験。

(実験2)

中心窩順応輝度とそれによって決まる輝度差弁別閾との関係を求める実験。

(実験3)

観測者の中心窩順応輝度と等価光幕輝度とが異なる視野条件に対する輝度差

図2-9に実験3で観測者に提示した視野とその輝度の時間的变化を示す。観測者の目を15分間ほぼ暗黒の視野に順応させた後、図2-9(a)に示すように、輝度Lv1の光幕に5分間予備順応させた。その後、図2-9(b)に示すように、光幕輝度をLv2として約1/2秒後に、視標とその背景を1/8秒間提示し、提示終了後約1/2秒後にまた光幕輝度をLv1に戻してその視野に順応させるとともに、観測者に視標が視認できたか否かを回答させた。このような輝度の提示条件によって、視標が提示されときの観測者の中心窩順応輝度はLv1、光幕輝度はLv2のように、異なる輝度条件を設定した。この観測を背景輝度を変化させて繰り返し、観測結果から50%の確率で視標が視認できるための視標とそ

図2-10に実験1と実験2の結果を示す。図の曲線Aは実験1の結果を、曲線Bは実験2の結果を示す。次に前節の実験結果と同様に、曲線Aと曲線Bとの差を求め、これを光幕輝度による輝度差弁別閾の成分とした。図2-11にこのようにして求めた光幕輝度とそれによる輝度差弁別閾の成分との関係(曲線C)を示す。また、図2-12に実験3の結果を、光幕輝度をパラメータとし、中心窩順応輝度と輝度差弁別閾との関係として示す。図中の各シンボルはそれぞれ光幕輝度が1, 3, 10, 30, 100, 300 cd/m²の条件のときの結果を示す。

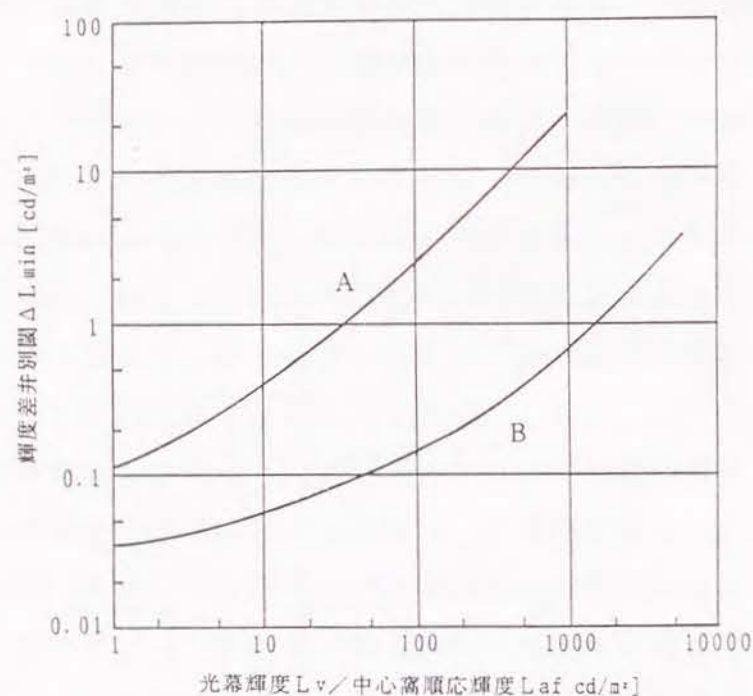


図2-10 光幕輝度および中心窩順応輝度と輝度差弁別閾との関係

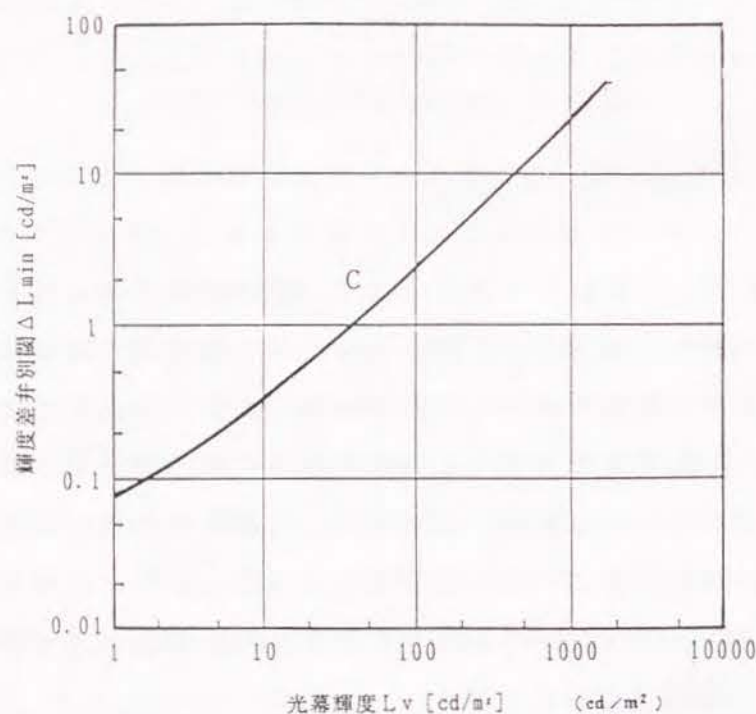


図2-11 光幕輝度と輝度差弁別閾との関係

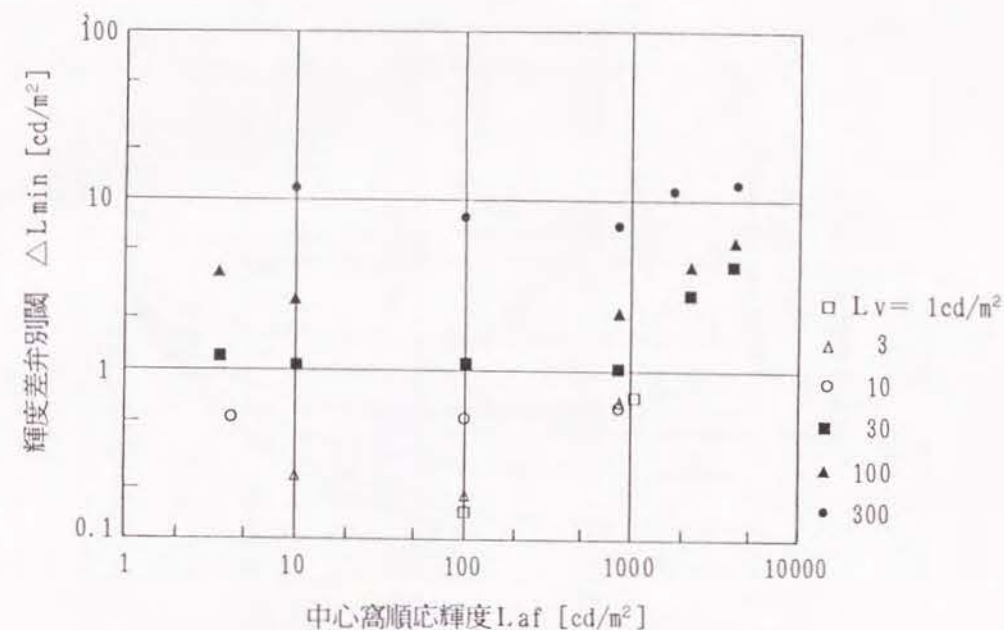


図2-12 中心窩順応輝度と輝度差弁別閾との関係
(光幕輝度をパラメータとして)

(3) 仮説の検討

仮説が成立するためには、観測者の中心窩順応輝度と光幕輝度とが異なる視野条件に対して、実際にその視野を用いた観測実験から求めた輝度差弁別閾と、そのときの中心窩順応輝度による輝度差弁別閾と光幕輝度による輝度差弁別閾の成分とを加算して求めた輝度差弁別閾とが等しいことが必要である。そこで、実験3での中心窩順応輝度と光幕輝度を種々組み合わせた視野条件に対する輝度差弁別閾を、前述の仮説が成立すると仮定して次式から算出した。

$$\Delta L_{\min}(L_{af}) + \Delta L_{\min}(L_{eq}) = \Delta L_{\min}(cal) \quad (2-4)$$

ここで、 $\Delta L_{\min}(cal)$ は計算によって求めた輝度差弁別閾、 $\Delta L_{\min}(L_{af})$ は中心窩順応輝度による輝度差弁別閾であり、中心窩順応輝度の値から図2-10の曲線Bを使って読み取った。また $\Delta L_{\min}(L_{eq})$ は光幕輝度による輝度差弁別閾の成分であり、光幕輝度の値から図2-11の曲線Cを使って読み取った。

以上のようにして算出した輝度差弁別閾 $\Delta L_{\min}(cal)$ と中心窩順応輝度との関係を、光幕輝度をパラメータとして、図2-13に実線で示す。図の各プロット点は、実験3の結果を示す。図から観測実験によって求めた輝度差弁別閾は各実

線とはほぼ一致するといえる。

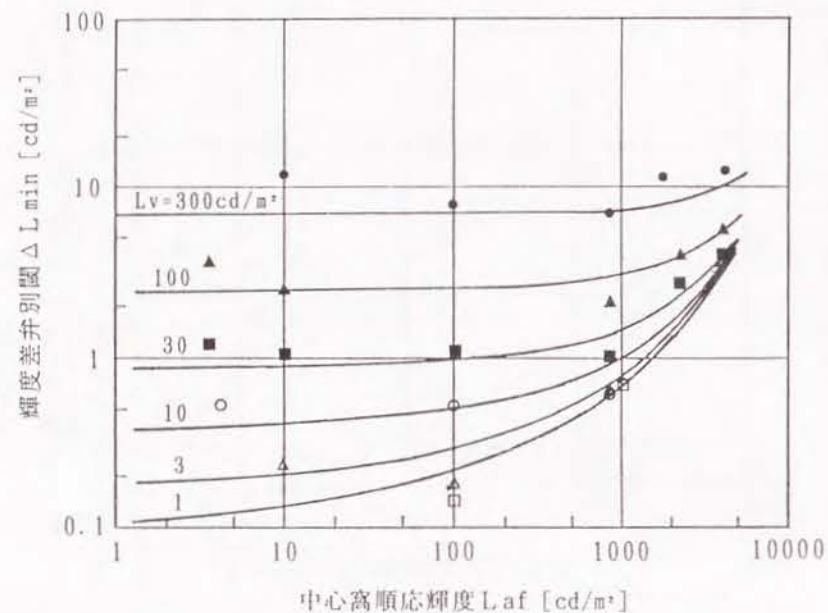


図2-13 中心窩順応輝度と輝度差弁別閾との関係
(光幕輝度をパラメータとして)

このことをさらに詳細に検討するため、仮説に基づいて算出した輝度差弁別閾 $\Delta L_{\min}(\text{cal})$ と観測実験（実験3）によって求めた輝度差弁別閾（ $\Delta L_{\min}(\text{exp})$ とする）との対応関係を調べた。その結果を図2-14に示す。図の各点はほぼ傾き 45° の直線上にあり、両者の関係は、 $\Delta L_{\min}(\text{cal}) = \Delta L_{\min}(\text{exp})$ となることがわかった。すなわち、算出した輝度差弁別閾と観測実験より求めた輝度差弁別閾はよく一致することが確認できた。

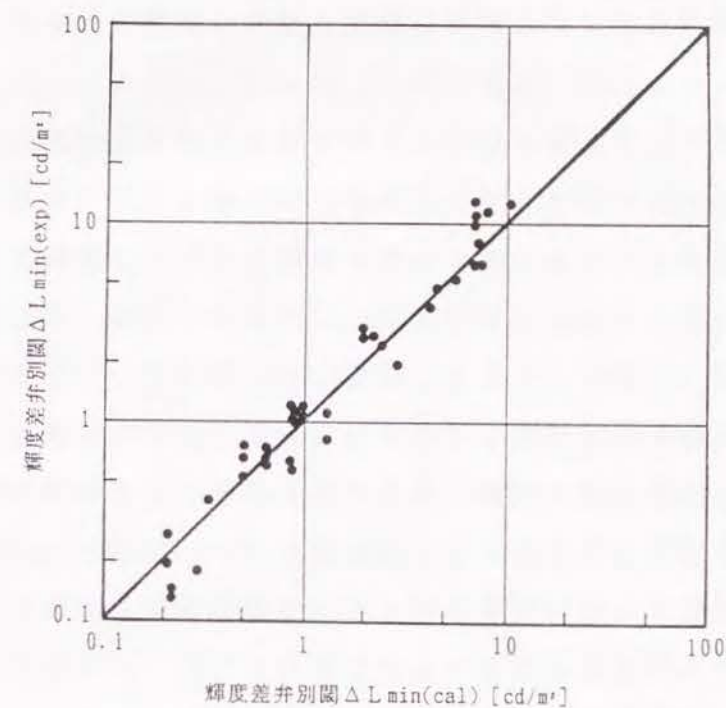


図2-14 輝度差弁別閾（計算値）と輝度差弁別閾（観測値）との関係

以上から、前述の仮説は成立し、中心窩順応輝度と等価光幕輝度とが異なる条件の視野に対する輝度差弁別閾は、中心窩順応輝度による輝度差弁別閾と等価光幕輝度による輝度差弁別閾の成分とを加算して求められることが明らかになった。したがって、複雑な視野での輝度差弁別閾は、その視野での中心窩順応輝度と等価光幕輝度とを求め、それぞれによる輝度差弁別閾を求め、それらの和から求められることが明らかになった⁽⁴⁹⁾。

2. 3 複雑な視野に対する順応に関する計測

2. 3. 1 輝度差弁別閾の計測

前節までの結果から、ある視野に対する中心窩順応輝度と等価光幕輝度が分かれば、その視野での輝度差弁別閾が求められるようになった。したがって、実際の視環境での輝度差弁別閾を計測できるようにするためには、まず、その視野に

対する中心窩順応輝度と等価光幕輝度を測定できるようにすることが必要である。そこで、実際の視環境での中心窩順応輝度と等価光幕輝度を測定する方法を検討した。

中心窩順応輝度は、中心窩が順応しているであろう輝度であるから、例えばある輝度の対象物を十分に注目している場合には、その対象物の輝度を中心窩順応輝度とすることができる。しかし、人間は視線を移動し、視野内の様々な輝度の対象物を順次注目することが少なくない。このような場合、中心窩順応輝度は個々の対象物の輝度と異なっていると考えられる。

ここで、中心窩順応輝度は中心窩の感度に対応し、この感度は中心窩の視細胞、すなわち錐体の視物質濃度と関係すると考えられる。錐体の視物質濃度の明順応時と暗順応時の時間的変化の特性が、Rushton⁽⁵⁰⁾によって明らかにされている。そこで、この時間的変化の特性を応用して、様々な輝度の対象物に視線を移動したときの中心窩順応輝度を予測する方法を検討した⁽⁵¹⁾。すなわち、まず、観測者が種々の輝度の対象物を、さまざまな時間だけ注視した場合の視物質濃度を算出した。いっぽう、さまざまな輝度に中心窩が十分に順応したときの視物質濃度を算出し、中心窩順応輝度と視物質濃度との関係を求めた。この関係と、前述の視物質濃度の算出結果から、中心窩順応輝度を求める方法である。この方法によると、種々の輝度の対象物を、様々な時間だけ注視したときの中心窩順応輝度は、それぞれの輝度と注視時間の積の平均に対応することが明らかになった。

以上から対象物を十分な時間注目していたり、視線を様々移動するなど、様々な条件での中心窩順応輝度を測定することが可能となった。

一方、等価光幕輝度は、視野内の輝度分布を測定すれば、(2-3)式を用いて算出できるが、実際の複雑な視野の輝度分布を逐次測定し、さらに(2-3)式を用いて等価光幕輝度を計算することは困難である。これ代わる方法として、Fryら⁽⁴⁹⁾によって減能グレアの測定を目的に開発された「Glare Lens」を利用する方法が考えられる。そこで、Glare Lensと輝度計を組み合わせた測定装置（等価光幕輝度計と呼ぶ）で、等価光幕輝度を測定できるどうかを確認するための実験を行なった⁽⁵²⁾。

実験は、まず、等価光幕輝度の算出が容易な比較的単純なパターンの周辺視野を用意（中心視野はほぼ暗黒とした）し、観測者の目をその視野に順応させたと

きの輝度差弁別閾を求めた。このときの視標とその背景は、前節で述べた中心窩順応輝度や光幕輝度と輝度差弁別閾との関係を求める実験で用いた視標提示装置によって提示した。この観測実験を周辺視野の輝度を変化させて繰り返し、その結果から、等価光幕輝度と輝度差弁別閾との関係を求めた。この場合の等価光幕輝度の値は、(2-3)式を用いて算出する。また、同じ視野に対して、等価光幕輝度計を用いて測定し、その測定値と等価光幕輝度との関係を求めた。次に実際の複雑な輝度分布の視野（ただし、中心視野はほぼ暗黒とした）に対して、上述の視標提示装置を用いて視標とその背景とを提示して輝度差弁別閾を求めた。また、同じ視野に対して等価光幕輝度計を用いて測定し、その測定値から前述の「測定値と等価光幕輝度との関係」を用いて、等価光幕輝度を求めた。このようにして求めた輝度差弁別閾と等価光幕輝度との関係を、前述の単純なパターンの視野に対して求めた輝度差弁別閾と等価光幕輝度との関係と比較した。その結果、両者はよく一致したので、実際の複雑な輝度分布の周辺視野の等価光幕輝度はGlare Lensと輝度計を組み合わせた等価光幕輝度計を用いて容易に測定できることが確認できた。

以上により、実際の視環境においても中心窩順応輝度と等価光幕輝度は比較的容易に測定できることが明らかになった。したがって、複雑な視野での輝度差弁別閾は以下の手順によって求められる。

- 1) 中心窩順応輝度 L_{af} を測定する。
- 2) 等価光幕輝度 L_{eq} を測定する。
- 3) 中心窩順応輝度と輝度差弁別閾との関係（図2-7の曲線B）を用い、 L_{af} からそれに対応する輝度差弁別閾 $\Delta L_{min}(L_{af})$ を読み取る。
- 4) 等価光幕輝度と輝度差弁別閾との関係（図2-8の曲線C）を用い、 L_{eq} からそれに対応する輝度差弁別閾 $\Delta L_{min}(L_{eq})$ を読み取る。
- 5) $\Delta L_{min}(L_{af})$ と $\Delta L_{min}(L_{eq})$ との和を求める。

この和の値が、その視野での輝度差弁別閾となる。

2. 3. 2 順応輝度の計測

(1) 順応輝度の計測原理

以上から複雑な視野での輝度差弁別閾が求められるようになった。この輝度差弁別閾の値によって、その視野での目の順応状態を数量的に表わすことができる。しかし、輝度差弁別閾の値は、視標の大きさや提示時間、また観測者などの条件によって変化する。したがって、2. 1 節で述べたように、ある複雑な視野に順応したときの輝度差弁別閾と等しい輝度差弁別閾となる均一な視野（必ずしも全視野が均一である必要はなく、ある視野範囲が均一な輝度をもち、他の範囲がほぼ暗黒という単純な輝度分布の視野でよい）の輝度によって、その複雑な視野での目の順応状態を表わす方法が普遍的である。ここでは、均一な視野として全視野が均一な輝度分布の視野を用い、その視野の輝度を「順応輝度」として目の順応状態を表わすこととした。すなわち、ある複雑な輝度分布の視野に順応したときの目の順応状態を、そのときと等しい輝度差弁別閾を生ずる全視野が均一な視野の輝度（順応輝度）によって表わすこととした。以下にある複雑な視野に対する順応輝度を求める手順を示す。

1) 前節で示した方法により、その複雑な視野に順応したときの輝度差弁別閾を求める。

2) 輝度分布が均一な視野に順応したときの輝度差弁別閾を同様の方法によって求め、均一視野の輝度と輝度差弁別閾との関係を求める。図2-15に求めた関係を示す。

3) 複雑な視野に対して求めた輝度差弁別閾の値から、図2-15の関係をを用い、同じ輝度差弁別閾の値となる均一視野の輝度を求める。この輝度が順応輝度である。

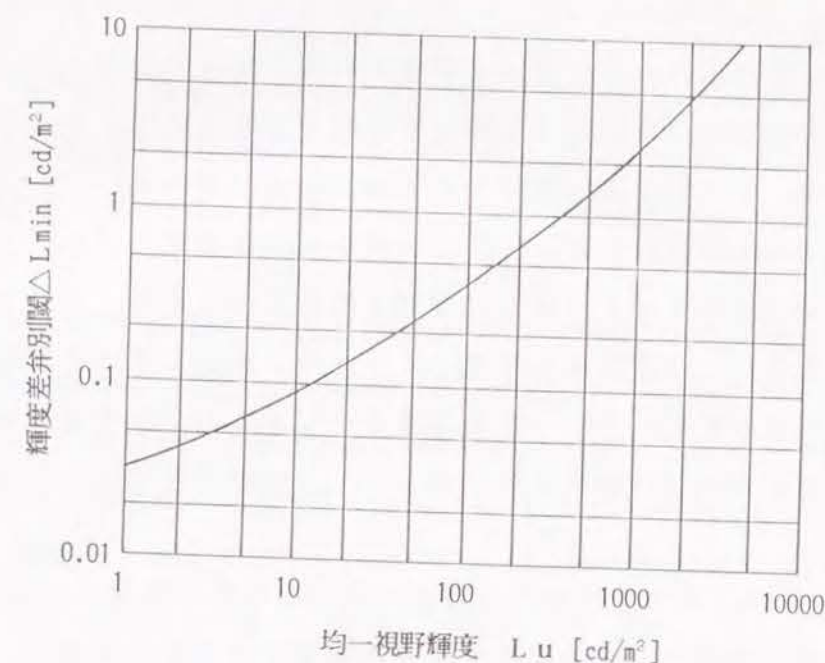


図2-15 均一視野輝度と輝度差弁別閾との関係

(2) 順応輝度の測定

堀井ら⁽⁵³⁾は、上述の順応輝度の測定方法をもとに、実際に順応輝度を測定する装置を開発した。図2-16に装置の外観を示す。



図2-16 順応輝度の計測装置

この装置を用いることによって、従来、実験室内で比較的単純な輝度分布の視野に観測者の目を順応させて求められた種々の視覚特性の実験や、所要照明レベルを求める見え方実験の結果を、実際の複雑な視環境に応用できるようになった。その一例として、トンネル入口照明への応用について述べる。

昼間のトンネル入口付近において、トンネル入口部を見たとき、トンネル入口部の照明が不十分であるとトンネル内部が「暗い穴」に見え、トンネル内部の障害物が視認できない。この原因は昼間、トンネルに接近している運転者の目の順応状態が高い輝度に順応しているためである。このため、障害物を確実に視認できるように、運転者の目の順応状態に応じて、入口部の照明レベルを制御する必要がある。

Schreuder⁽³¹⁾は、ある視野範囲の輝度が均一な視野に観測者の目を順応させた条件で、観測者に障害物に相当する対象物を提示する実験を行ない、その結果からトンネル入口境界部の所要路面輝度と視野の輝度との関係を明らかにした。したがって、実際のトンネル入口付近で、運転者の目の順応状態が、Schreuderが実験に用いた視野のどの輝度条件のときと等しいかが求められれば、所要路面輝度が求められる。そこで、成定ら⁽⁴⁴⁾は、前述の測定装置を用い、実際の多数のトンネル入口付近での運転者の目の順応輝度を測定し、これらの測定結果をもとに、野外輝度（トンネル入口前方約100m以上の距離から、トンネル入口を見たときの直径20°の円形の視野の平均輝度と定義されている）の1.5倍の輝度値がSchreuderが順応に用いた視野の輝度にほぼ一致することを明らかにした。これより、トンネル入口境界部の所要路面輝度を設定するときに必要な運転者の目の順応状態は野外輝度を測定することによって求められることが明らかになり、野外輝度の測定値をもとに入口境界部の路面輝度を制御できることになった⁽⁵⁴⁾。この方法は、現在、わが国のトンネル入口部の照明制御方法として採用されている⁽⁷⁾。

[参考文献]

(26) Holladay L.: The fundamentals of glare and visibility. J. Opt. Soc. Amer. Vol.12 (1926) 271-319

(27) Crawford B.H.: Visual adaptation in relation to brief conditioning stimuli. Proc. Roy. Soc. (London) Vol.B134 (1947) 283-302

(28) Blackwell O.M., Blackwell H.R.: Visual performance data for 156 normal observers of various ages. J. Illum. Engng. Soc. Vol.1 (1971) 3-13

(29) Stiles W.S.: The effect of glare on the brightness difference threshold. Proc. Roy. Soc. (London) Vol.104B (1929) 322-355

(30) 野口太郎、大月容子、伊藤克三：実効対比を用いた視認能力の把握。日本建築学会論文報告集 第326号（昭和58年）111-117

(31) Schreuder D.A.: Contrast sensitivity in test field with bright surround. J. Opt. Soc. Amer. Vol.55 (1965) 729-731

(32) 例えば、Hecht S., Haig C., Chase A.M.: The influence of light adaptation on subsequent dark adaptation of the eye. J. Gen. Physiol. Vol.20 (1937) 831-850

(33) 吉村義典、武内徹二、猪野原 誠：中心視での輝度差弁別閾に関するHolladayの原理の検討。照明学会誌 Vol.61 (1977) 713-720

(34) Crawford B.H.: The integration of the glare effects from a number of glare sources. Proc. Roy. Soc. (London) Vol.48 (1936) 35-37

(35) Moon P., Spencer D.E.: The specification of foveal adaptation. J. Opt. Soc. Amer. Vol.33 (1943) 444-456

(36) Stiles W.S., Crawford B.H.: The effect of a glaring light source on extrafoveal vision. Proc. Roy. Soc. Vol.122B (1937) 255-280

(37) Fry G.A.: A re-evaluation of the scatter theory of glare. Illum. Engng. Vol.49 (1954) 98-102

(38) Vos J.J., Bouman M.A.: Disability glare; Theory and practice. Proc. of CIE Brussels (1959) 298-307

(39) Boynton R.M., Enoch J.M., Bush W.R.: Physical measures of stray light in excised eyes. J. Opt. Soc. Amer. Vol.44 (1954) 879-886

(40) Fry G.A., Pritchard B.S., Blackwell H.R.: Design and calibration of a disability glare lens. Illum. Engng. (1963) 120-123

- (41) Vos J.J.: Disability glare - A state of the art report -. CIE Journal Vol.3 (1984) 39-53
- (42) Narisada K., Yoshimura Y.: Adaptation luminance of driver's eyes at the entrance of tunnel...an objective measuring method. Proceedings of International Symposium on Measures of Road Lighting Effectiveness. Karlsruhe (1977)
- (43) 吉村義典、武内徹二、成定康平: 中心視での輝度差弁別いきに及ぼす周辺視野の輝度の影響. 照明学会誌 Vol.62 (1978) 220-226
- (44) Narisada K., Yoshikawa K., Yoshimura Y.: Adaptation luminance of driver's eyes approaching a tunnel entrance in daytime. Proc. of CIE 19th Session (1979) 409-413
- (45) Inohara M., Yoshimura Y., Takeuchi T.: Luminance contrast threshold of human eyes adapted to a luminance differentiated from that of object's background. Proc. of CIE 19th Session (1979) 193-197
- (46) Narisada K.: Visual perception in non-uniform fields. J. Light & Env. Vol.16 (1992) 81-88
- (47) 猪野原 誠、武内徹二、吉村義典: 明るさ(視感輝度)の計測
テレビジョン学会技術報告 VV140-3. (1980) p.69
- (48) 武内徹二、宇野智恵子、猪野原 誠: 中心窩順応輝度による輝度差弁別いき成分と等価光幕輝度による輝度差弁別いき成分との加法性の検討、昭和59年照明学会全国大会講演論文集 (1984) 72
- (49) 武内徹二、成定康平: 中心窩順応輝度と光幕輝度とに対する輝度差弁別閾の加法性. 照明学会誌 (投稿中)
- (50) Rushton W.A.H.: Kinetics of cone pigments measured objectively on the living human fovea. Ann. N.Y. Acad. Science. Vol.74 (1958) 291-304
- (51) 大竹史郎、武内徹二、吉村義典: 視物質濃度の計算に基づく中心窩順応輝度の予測. 昭和61年電気関係学会関西支部連合大会予稿集 (1986) G362
- (52) 武内徹二、吉村義典、猪野原 誠: 周辺視野の中心視への影響(3)(等価光幕輝度の物理的測定). 昭和51年度照明学会全国大会予稿集 (1976) 46
- (53) 堀井 滋、吉村義典、重田照明、西山英夫: 明るさ計(アバレントブライト

ネス計)の試作. 昭和53年照明学会全国大会予稿集 (1978) 51

- (54) 吉川孝次郎、田辺吉徳、吉村義典: トンネル入口付近における野外輝度と運転者の目の順応輝度. 昭和54年照明学会全国大会予稿集 (1979) 69

第3章 ブライトネスの尺度に関する研究

第2章で述べたように、実際の複雑な視環境に順応しているときの目の順応状態を求められるようになった。これによって、ブライトネスの応用に関する一つの課題が解決できた。たとえば、まず予め従来のブライトネスの研究での実験で観測者の目を順応させるために用いられた視野に対して、視野の輝度とその視野に順応したときの輝度差弁別閾との関係を求める。次に実際の視環境に順応しているときの輝度差弁別閾を求め、前述の関係をj用いて、求めた輝度差弁別閾の値と等しい輝度差弁別閾の値となる（実験にj用いた）視野の輝度を求める。これによって、ブライトネスの2つの要因のうちの一方を求めることができる。ここで、もう一つの要因である対象物輝度は容易に測定できる。したがって、この方法を用いることによって、従来の研究から明らかにされたブライトネスの尺度と定量化式をj応用して、実際の視環境での対象物のブライトネスを求めることが可能である。そこで、ブライトネスを照明設計にj応用していく場合に、ブライトネスの尺度そのものが実用的かどうかは次の問題となる。

3. 1 従来の尺度

第1章において、従来のブライトネスに関する代表的研究を述べたが、ここではそれらの研究で示されたブライトネスの尺度をブライトネスをj応用するという観点から、それらの実用性について比較検討する。

ブライトネスの尺度は、従来のそれぞれの研究において、明るさの程度を数値化するときの基準の物差しとなるものであり、その値は明るさの評価方法や実験にj用いた視野の条件などによって異なると考えられる。たとえば、明るさの評価方法として、観測者に予め「ブライトネスを100」とする明るさの条件を基準条件として提示し、これを観測者に記憶させ、様々な条件で提示した対象物の明

るさの程度を直接評価させる直接評価法を用いた場合には、基準条件として提示された「ブライトネス100」という明るさの程度を基準として相対的なブライトネスの尺度が構成される。

また、別な方法として二等分法という方法がある。この方法は、予めブライトネスの2つの基準を設定し、それら2つの基準の明るさの中間の明るさに感じられる対象物の条件を観測実験によって求め、その条件の対象物のブライトネスの値を、前述の2つの基準のブライトネスの値の中間の値とする。このような観測実験を繰り返して、その結果からブライトネスの尺度を求める。

いっぽう、増分閾値法を用いてブライトネスの尺度を求める方法がある。この方法は、まず基準となる対象物の条件を一つ設定する。たとえばこれのブライトネスを1とする。次にブライトネスが1の対象物と比較し、それよりも“やっと明るい”と感じられる限界の対象物のブライトネスの値を2とする。これを繰り返して、明るさの差の閾値を1単位としたブライトネスの尺度が構成される。このようにして求められた尺度では、閾値を積み重ねて明るい条件までのブライトネスの値が決定される。この場合、閾値を積み重ねていくときのそれぞれの段階での観測のときに生ずるわずかな誤差が積み重なり、その結果として大きなブライトネスの値には、大きな誤差が生ずることがある。このため、増分閾値法によって求められたブライトネスの尺度は、必ずしも正確な尺度とはいえないという問題があった。

また、第2章で述べたように、観測者が順応している視野の輝度が等しい場合でも、その視野の大きさが異なると、観測者の順応状態は異なる。したがって、ブライトネスの尺度の設定では、視野の条件を正確に規定することが重要である。そこで、従来の研究のうち、直接評価法と二等分法などによって求められたブライトネスの尺度における視野の条件を比較した。

1) Hopkinsonの尺度⁽¹⁾⁽²⁾

視標の大きさ	2度
順応視野	十分に大きい（正確な大きさは不明）
提示時間	不明

2) Stevensらの尺度⁽¹⁾⁽³⁾

視標の大きさ	5. 7度
--------	-------

順応視野 58度

提示時間 2秒

3) Bodmannらの尺度⁽¹⁸⁾

視標の大きさ 10分から2度

順応視野 180度

提示時間 1秒

以上のなかで、Hopkinsonの尺度では、その尺度を求めたときに観測者の順応用に用いた視野の大きさが正確に知ることができない。そこで、Stevensらの尺度と、Bodmannらの尺度について、以下、その実用性と問題点について検討した。

3. 2 実用的尺度の要件と従来の問題点

ブライトネスを照明分野に応用する場合を考えると、たとえば、ブライトネスを測定して、ある視環境での対象物の明るさの程度を数量的に求めたり、あるいは明るさの大小を比較することがある。また、ある施設の照明を計画するときには、その施設での明るさの程度をどの程度にするかを検討する必要がある。これらの場合を想定して、ブライトネスの尺度としてどのような条件を満たす必要があるかという尺度の要件を考えると、以下のことがあげられる。

1) ブライトネスの値が「明るさの感覚」と比例すること。

たとえば、ブライトネスが10のときの明るさは、ブライトネスが5の時の明るさの2倍の明るさに感じられたり、ブライトネス4と2との明るさの差が、ブライトネス5と3との明るさの差と等しく感じられることが必要である。

2) ブライトネスの値が示す「明るさの程度」を容易に知ることができること。

ある施設の照明を設計する場合、設計者がその施設での対象物の明るさの程度をどの程度とするかを検討するときに、ブライトネスの数値だけでなく、その数値がどの程度の「明るさ」を示すものかを設計者自身が知る必要がある。また、ブライトネスを測定して施設を評価する場合も、ブライトネスの数値の大小が、実際の明るさの感覚としてどの程度であるかを知る必要がある。このためには、照明の設計者や測定・評価する者がブライトネスの尺度の視野条件を再現して、

ブライトネスの数値が示す明るさの程度を実際に見る必要がある。したがって、ブライトネスの尺度の視野条件は再現が容易であることが重要である。

3) 色彩や対比などの明るさ感覚への影響が少ない尺度条件とすること。

明るさの感覚は、対象物の色や対象物とその背景との輝度対比などによって影響を受ける。ここで定義されているブライトネスは「対象物の輝度と目の輝度順応によって決まる明るさの感覚」であるので、ブライトネスの基準となる尺度の条件は、できる限り色など、ブライトネスの定義で考慮していない条件による影響を無視できる条件とする必要がある。

以上のブライトネスの尺度の要件をもとに、従来の尺度の実用性を検討した。

まず、要件1)の明るさの感覚との比例関係については、いずれの研究の尺度も、それらを求める実験において人間が実際に観測したときの明るさの感覚に基づいてブライトネスの値を設定していることから、いずれも要件1)は満たす尺度と考えられる。そこで、前述の要件2)および3)について、従来の尺度の実用性と問題点を検討する。

まずHopkinsonの尺度では、その実験で観測者の順応用に用いた視野の大きさの条件が明確ではないので、実際にHopkinsonの尺度の視野条件を再現することができない。このため、ブライトネスの値が示す明るさの状態を正確に知ることが困難であり、要件2)を満足せず、ブライトネスの尺度としては実用性が低いと考える。

次にStevensらの尺度は、要件2)に対しては、ブライトネスの尺度の視野条件が明確にされており、その視野条件を再現することが可能であり、ブライトネスの値が示す明るさの程度を実際に観測することが可能である。ただし、尺度の視野条件は、暗順応している目に視角寸法が5.7度の視標を提示したものをブライトネスの尺度としていることから、明るさの程度を確認するためには、見る人の目を十分に暗順応させる視野条件を実現する必要がある。このため、一般に照明技術者が容易に観測して明るさの程度を確認できるとはいえない。また、要件3)に関しては、Stevensらの尺度では、視標以外の輝度はほぼ暗黒であり、視標に隣接する背景による対比効果などの影響はないと考えられるので、要件3)に対しては問題がないと考えられる。

次にBodmannらの尺度では、視角寸法が180度、すなわち半球状の視野を背景

に視標が提示されたときの明るさをもとにしている。したがって、Bodmannらの尺度によるブライトネスの値が示す明るさの状態を観測するためには、半球状の均一な輝度の視野を実際に製作しなければならない。しかし、半球状のほぼ均一な視野を実現することは容易ではなく、このため、Bodmannらの尺度は要件2)を満足しないと考えられる。

以上のように、従来のブライトネスの研究で報告された尺度は、それらの研究では、対象物の輝度と目の順応状態とブライトネスの3者の関係を正確に求めることを主眼としていたことから、尺度そのものの実用性の観点からは、必ずしも十分な検討がされているとは言えない。そこで、前述のブライトネスの尺度の要件を満足する尺度を実験的に検討した。

3. 3 ブライトネスの実用尺度に関する実験検討

ブライトネスの尺度を検討する場合、前節で述べたように、まず第一にブライトネスの値が明るさの感覚と比例関係であることが重要であるが、実用性を考えると、それを利用する人が容易にブライトネスの値が示す明るさの状態を再現して観測できることも重要である。さらにブライトネスの値が、それを利用する照明技術者や建築設計者などが従来の明るさの判断に利用していた数値と関連していると、明るさの程度を感覚的に推定しやすいという利点が考えられる。この意味で従来の明るさの判断に利用されている数値として、マンセル・バリューがある。マンセル・バリューは、周知のように、物体の白さ黒さを感覚に比例する数値として表わしたものであるが、反射物体の(広義の)明るさを示すものとして利用されている。そこで、ブライトネスの実用尺度として、マンセル・バリューと関連させた尺度を検討した(55)(56)(57)(58)(59)。

3. 3. 1 実用尺度の基本的条件

マンセル・バリューの数値は特定の視野条件下で行なわれた「明るさ」の等間隔性の実験から求められており、その実験の視野条件においては、マンセル・バリューは明るさの感覚と比例すると考えられる。このため、ブライトネスの尺度

の視野条件として、マンセル・バリューが求められた視野条件に近い条件とした。すなわち、尺度の視野条件を以下のようにした。

(a) 視標の大きさ・・・視角寸法2度の円形

(b) 視標の提示時間・・・無制限

観測者は視標を十分に注視し、その輝度に中心窩が順応するものとした。

(c) 順応視野・・・視角寸法20度の円形

輝度は 6.1 cd/m^2 (マンセル・バリューが5の無彩色色票を1000ルクスで照明したときの輝度に相当)

(d) ブライトネスの値・・・マンセル・バリューが1の無彩色色票を視標として、それを1000ルクスで照明したときの輝度を持つ視標の明るさをブライトネスが1、またマンセル・バリューが9の無彩色色票を視標として、それを1000ルクスで照明したときの輝度を持つ視標のブライトネスを9とした。

以上のように、まず、ブライトネスが1と9の条件を設定し、つぎにブライトネスが1～9の間の値となる視標の輝度条件を実験により求めた。

3. 3. 2 実用尺度の作成

ブライトネスが2～8の値となるときの視標の輝度条件を求めるため、マンセル・バリューを求める実験と同様に、二等分法による観測実験を行なった。実験は、図3-1に示すような、直径が視角寸法20度の円形の背景の中心に、三つの対象物Ob1、Ob2、Ob3を並べた観測視野を用いて、観測者にOb1、Ob3の輝度を固定した状態でOb2の輝度を種々に変化させて提示し、三つの対象物の明るさが等間隔となるように見えるときのOb2の輝度を求める恒常刺激法を用いた。

以下に実験条件、結果などを示す。

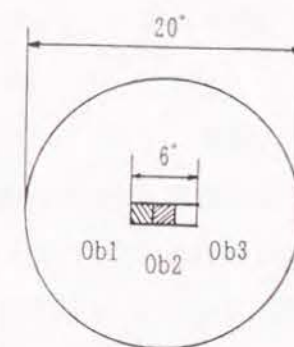


図3-1 観測者の視野（観測視野）

(1) 実験装置と実験条件

図3-2に実験装置の概略図を示す。

光源LB1は三つの対象物Ob1、Ob2、Ob3の輝度を与えるための光源で、40Wの蛍光灯3灯を用いて、三つの対象物の輝度をそれぞれ独立に設定できるようにした（輝度は $Ob1 < Ob2 < Ob3$ ）。光源LB2は三つの対象物の背景を1000ルクスで照明するための光源で、これによって背景輝度を 61 cd/m^2 という条件を実現した。背景には、マンセル・バリューが5の無彩色色票を用いた。制御部Cは三つの対象物の輝度、提示時間および提示のタイミングを制御する装置である。

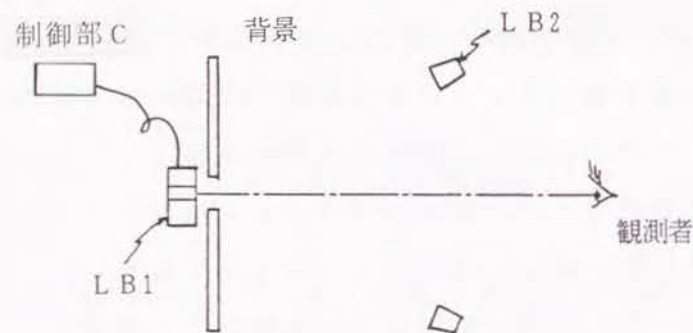


図3-2 実験装置の概要

実験条件は以下のようにした。

(a)対象物 大きさ・・・一辺が視角寸法2度の正方形。

提示時間・・・Ob1とOb3は連続的に提示

Ob2は1秒

輝度・・・可変

(b)背景・・・視角寸法20度の円形、輝度は 61 cd/m^2

(c)観測者・・・3名

(2) 観測

以下の手順に従って、観測者に対象物を観測させた。

1)観測者を15分間ほぼ暗黒の視野に暗順応させた。

2)観測者にOb1とOb2の輝度を 3.4 cd/m^2 （ブライトネス $B=1$ に相当する輝度）、

Ob3の輝度を 267 cd/m^2 （ $B=9$ に相当する輝度）とした順応視野（図3-3（a））を提示し、その視野に5分間順応させた。

3)Ob2の輝度を、Ob1の明るさとOb3の明るさの中間の明るさに比べて、十分に暗いと判断される輝度の値から十分に明るい判断される値までの範囲（7段階の輝度を設定）の、ある輝度値に設定したテスト視野（図3-3（b））を1秒間提示した。

観測者は、提示されたテスト視野を観測して、Ob2の明るさがOb1とOb3の中間となる明るさに比べて、「明るい」か「暗い」か「等しい」かを回答した。

4)テスト視野の提示後、再び順応視野を提示し、その視野に観測者の目を10秒間順応させた。

5)3)と4)の手順を、Ob2の輝度を7段階の輝度の中からランダムに変化させて提示し繰り返した。同じ輝度のOb2に対する観測を10回繰り返した。

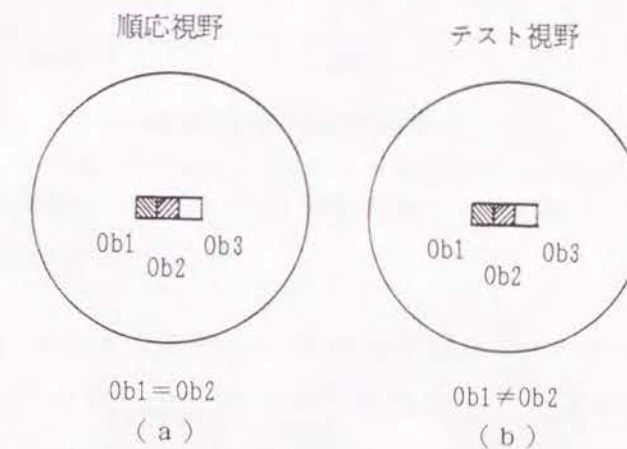


図3-3 観測者の視野（順応視野とテスト視野）

以上の観測結果から、各観測者が50%の確率で「明るい」と判断するときのOb2の輝度と、50%の確率で「暗い」と判断するときのOb2の輝度を求め、それらの相乗平均をその観測者がちょうど「等しい」と判断するときのOb2の輝度として求め、この輝度を $B=5$ （ B が1と9の中間の値）に相当する輝度とした。

次にOb1の輝度を $B=1$ に相当する輝度に、Ob3の輝度を $B=5$ に相当する輝度にそれぞれ設定し、上記の観測を繰り返し、 $B=3$ に相当する輝度を求めた。

(3) 結果

これらの観測を、順次0b1と0b3の輝度を変化させて繰り返し、ブライトネスが2～8に相当する対象物の輝度を求めた。その結果を図3-4に示す。図中の各プロット点は観測者3名の平均値である。

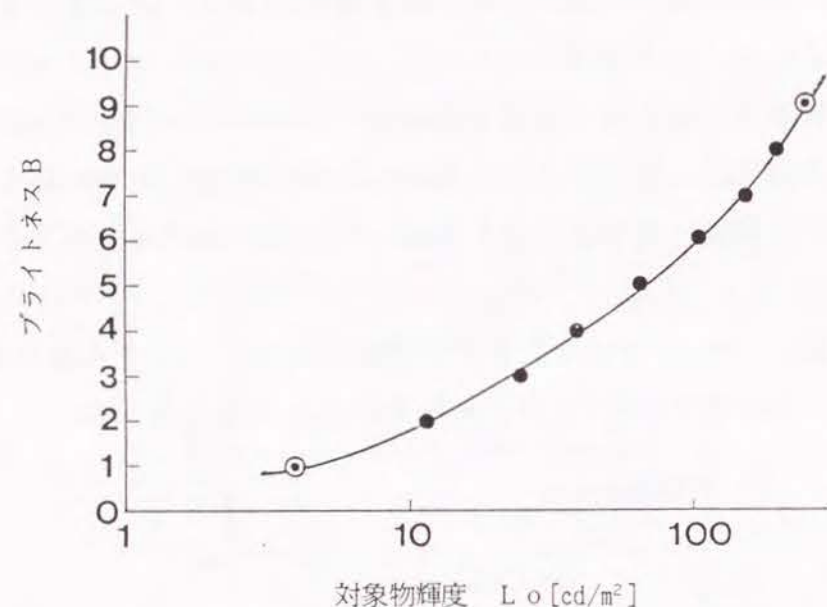


図3-4 対象物輝度とブライトネスとの関係

ここで、ブライトネスが1と9の輝度の値は、それぞれマンセル・バリューが1と9の無彩色色票を1000ルクスに照明したときの輝度と一致している。そこで、今回の実験で求めたブライトネスが2～8のそれぞれに相当する輝度が、1000ルクスで照明された無彩色色票の輝度と一致するときのマンセル・バリューを求めた。その結果を図3-5に示す。図からブライトネスが2～8となる輝度は、それぞれマンセル・バリューが2～8の無彩色色票を1000ルクスで照明したときの輝度とほぼ一致することが明らかになった(59)。

以上から、ブライトネスの実用的な尺度が設定された。この尺度は無彩色色票を組合せ、それを1000ルクスで照明することによって容易に再現することが可能である。すなわち、図3-6のように、マンセル・バリューが5の無彩色色票を背景として、その中心に観測してみたいブライトネスの値と等しいマンセル・バリューの無彩色色票を配置し、それらを1000ルクスで照明して観測する

ことによって、ブライトネスの値が示す明るさの程度を容易に観測してみることが可能である。

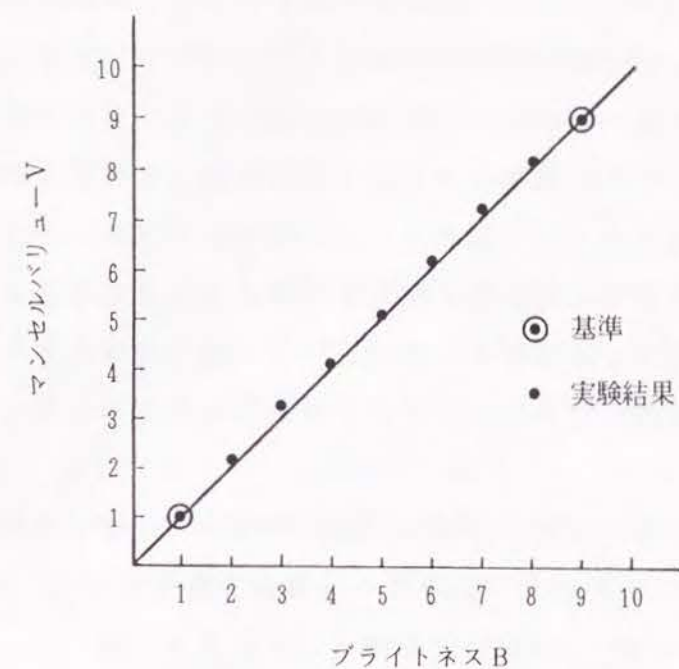


図3-5 ブライトネスと無彩色色票のマンセルバリューとの関係
(無彩色色票を1000ルクスで照明した場合)

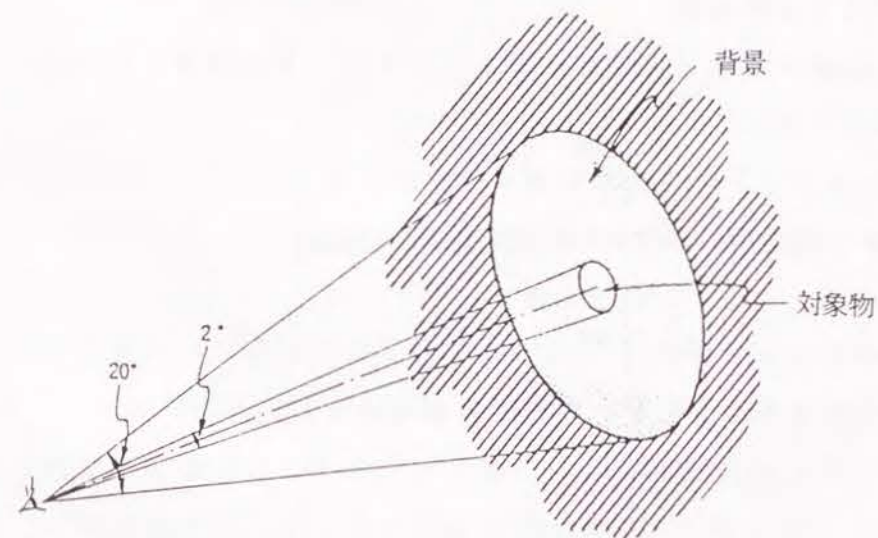


図3-6 ブライトネスの尺度の観測条件

3. 3. 3 ブライトネスの尺度の拡張

前節で示したように、ブライトネスが1～9までの尺度が明らかになった。しかし、その尺度では、ブライトネスが9または10（マンセル・バリューが10に相当する輝度を再現した条件を含めて考えるとブライトネスが10に相当する対象物の輝度を算出でき、その条件は容易に再現できる）までの明るさを表わすが、10を超える明るさの対象物のブライトネスの値は示すことができない。これに対して、実際の視環境では、自発光している物体のように、さらに明るい対象物が少なくなく、それらの対象物の明るさを評価する必要がある。このため、ブライトネスの1単位当りの明るさの間隔が、10以下のブライトネスの尺度と等しい間隔となるような、ブライトネスが10以上の明るさに対する尺度を実験的に検討した⁽⁶⁰⁾。

実験は、3. 3. 2節の実験と同様に、直径が視角寸法20度の円形の背景の中心に、三つの対象物Ob1、Ob2、Ob3を並べた観測視野を用いて、観測者にOb1、Ob2の輝度を固定した状態でOb3の輝度を種々に変化させて提示し、三つの対象物の明るさが等間隔となるように見えるときのOb3の輝度を求める恒常刺激法を用いた。以下に実験条件、結果などを示す。

(1) 実験装置と実験条件

実験では、前節の実験と同様に、図3-2に示す実験装置を用いた。

実験条件は以下のようにした。

(a)対象物 大きさ・・・一辺が視角寸法2度の正方形。

提示時間・・・Ob1とOb2は連続的に提示

Ob3は1秒

輝度・・・可変

(b)背景・・・視角寸法20度の円形、輝度は61cd/m²

(c)観測者・・・3名

(2) 観測

以下の手順に従って、観測者に対象物を観測させた。

1)観測者を15分間はぼ暗黒の視野に暗順応させた。

2)観測者にOb1の輝度を93cd/m²（ブライトネスB=6に相当する輝度）、Ob2とOb3の輝度を318cd/m²（B=10に相当する輝度）とした順応視野（図3-7（a））を提示し、その視野に5分間順応させた。

3)Ob3の輝度を、三つの対象物が左から順に等間隔で明るくなるように見えるときに比べて「十分に明るい」と判断される値から「十分に暗い」と判断される値までの輝度範囲（7段階の輝度を設定）の、ある輝度値に設定したテスト視野（図3-7（b））を1秒間提示した。

観測者は、提示されたテスト視野を観測して、三つの対象物の明るさが「ちょうど等間隔に見える」か、Ob3が「明るい」か「暗い」かを回答した。

4)テスト視野の提示後、再び順応視野を提示し、その視野に観測者の目を10秒間順応させた。

5)3)と4)の手順を、Ob3の輝度を7種類の輝度の中からランダムに変化させて提示し繰り返した。同じOb3の輝度に対して観測を10回繰り返した。

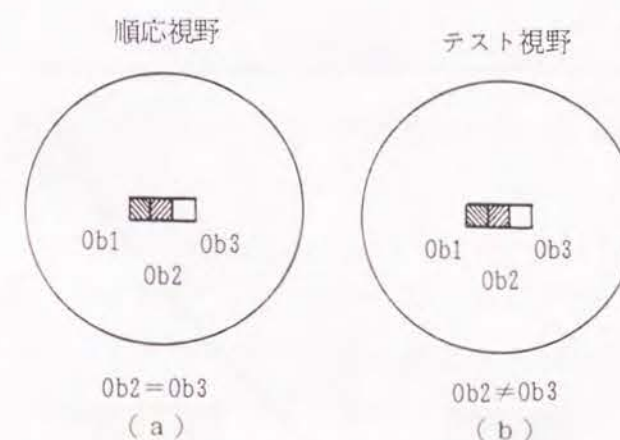


図3-7 観測者の視野（順応視野とテスト視野）

以上の観測結果から、各観測者が50%の確率で「明るい」と判断するときのOb3の輝度と、50%の確率で「暗い」と判断するときのOb3の輝度を求め、それらの相乗平均をその観測者がちょうど「等しい」と判断するときのOb3の輝度として求め、この輝度をB=14（B=10+（10-6））に相当する輝度とした。

次にOb1の輝度をB=10に相当する輝度に、Ob2の輝度をB=14に相当する輝度にそれぞれ設定し、上記の観測を繰り返し、B=18に相当する輝度を求めた。このように、Ob1、Ob2の輝度を順次高く設定し、Ob3の輝度が10000cd/m²を超

えるまで繰り返した。

また、以上のようにして求めたそれぞれのブライトネスに対応する対象物の輝度を検証するため、前節の実験と同様に、0b1と0b3の輝度を固定して0b2の輝度を変化させて、0b2が0b1と0b3のちょうど中間の明るさに感じられるための輝度を実験によって求め、結果がほぼ一致することを確認した。

なお、対象物の輝度を10000cd/m²までとしたのは、これを超える輝度の対象物では、明るさの感覚よりもグレアを感じるので、ブライトネスの尺度としては、それ以上の尺度は不要であると考えたためである。

(3) 結果

図3-8に観測実験の結果を、対象物の輝度とブライトネスとの関係として示す。観測者間の結果のばらつきは小さかったので、図では観測者3名の平均値をプロットした。図からブライトネスが10~30までに相当する対象物の輝度が明らかになった。

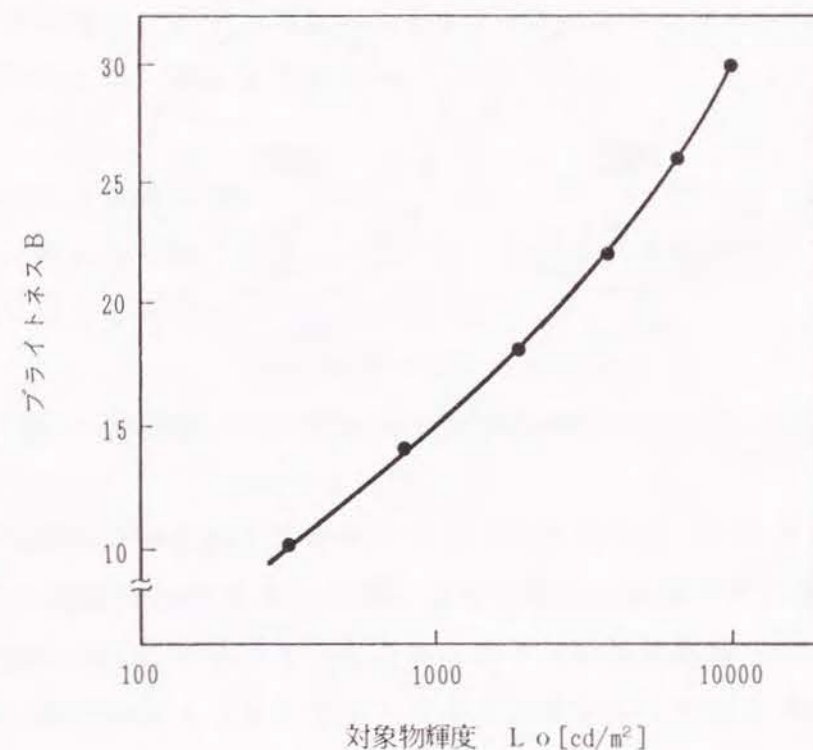


図3-8 対象物輝度とブライトネスとの関係
(ブライトネスが10以上の場合)

次に、今回の結果と前節の結果とを結合し、ブライトネスの実用尺度の視野条件でのブライトネスと対象物輝度との関係を求めた。その結果を図3-9に示す。これによって、ブライトネスが1~30までの尺度が明らかになった。

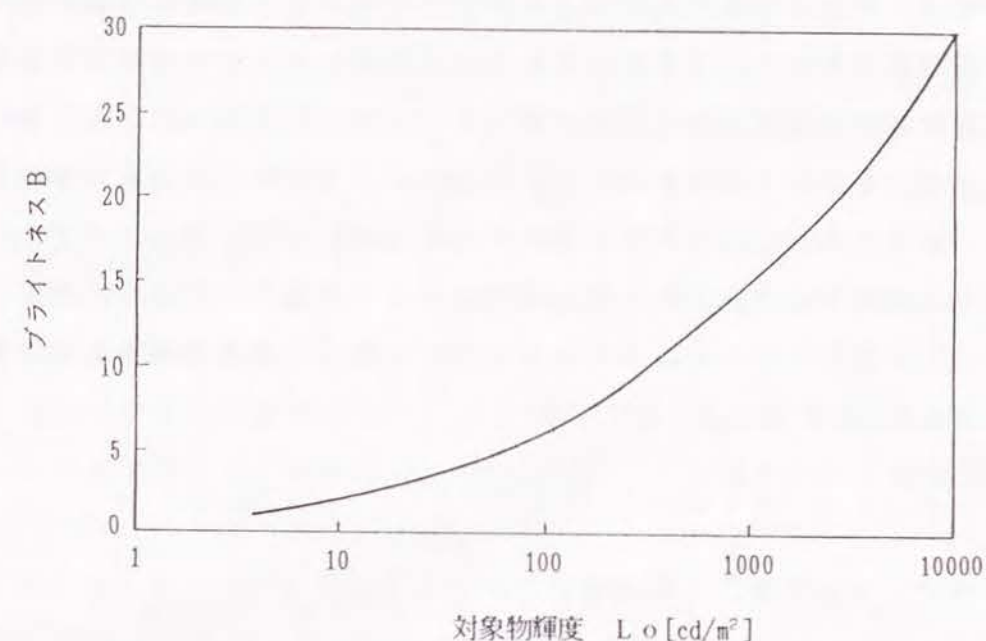


図3-9 ブライトネスの尺度での対象物輝度とブライトネスとの関係

3. 4 ブライトネスの定量化

前節までの検討で、ブライトネスの尺度が確立された。次に様々な対象物の輝度と目の順応状態の条件に対するブライトネスを算出するブライトネスの定量化式を実験により検討した(55)(56)(57)(58)(59)。

3. 4. 1 定量化式の考え方

ブライトネスは、対象物の輝度と目の順応状態を表わす数値との関数で定量化される。このうち、目の順応状態を表わす数値には、たとえばHopkinson⁽¹⁹⁾とBodmannら⁽¹⁸⁾はそれぞれ順応輝度、すなわち実験で観測者の目を順応させるために用いた均一視野の輝度を用いている。これに対してStevensら⁽¹¹⁾は順応しているときの視覚閾値と、その順応状態によって決まる定数を用いている。

ここで、定量化式の要件を考えると、まず様々な順応条件において、ブライト

ネスをより正確に算出できることが挙げられる。また、定量化式そのものが、明るさの知覚のメカニズムからみて合理的であることが望ましい。さらに、実用性を考えると、その式を用いたブライトネスの算出が容易であることが望ましい。

本研究では、ブライトネスの応用上の課題の一つである実際の複雑な輝度分布を有する視環境に対する目の順応状態を求める方法として、その視野に順応している時の輝度差弁別閾を求める方法を明らかにした。したがって、目の順応状態を表わす数値として輝度差弁別閾を用いると、ブライトネスを対象物輝度と輝度差弁別閾の値とからブライトネスを算出できることになる。そこで、ブライトネスの定量化式の変数のうち、目の順応状態を表わす数値としては輝度差弁別閾の値を用いることとし、ブライトネス B を以下のように、対象物輝度 L_o と輝度差弁別閾 ΔL_{min} の関数とすることとした。

$$B = F (L_o, \Delta L_{min}) \quad (3-1)$$

このように、対象物輝度と視覚閾値との関数としてブライトネスを定量化する方法は、すでに Stevensら⁽¹¹⁾によって報告されている（ただし、それらの定量化式では、視覚閾値の値だけでなく、目の順応状態によって決まる定数が含まれている。）。このなかでブライトネスの定量化式として、対象物輝度と視覚閾値との差を基本とした関数形式が示されている。

一方、対象物の輝度が、そのときの目の順応状態での光覚閾と等しい場合には、その対象物はやっと明るさが知覚できる程度の明るさと考えられ、また対象物の輝度が光覚閾の何倍かの値であるときにある程度の明るさに感じられると考えられる。このことから、ブライトネスは「対象物輝度が視覚閾値（今回の場合は輝度差弁別閾）の何倍かに関係する」と考えられる。すなわちブライトネスは対象物輝度 L_o と輝度差弁別閾 ΔL_{min} の次の関数となると考えられる⁽⁵⁵⁾⁽⁵⁶⁾。

$$B = F (L_o / \Delta L_{min}) \quad (3-2)$$

以上からブライトネスの定量化式としては、従来の定量化式のような、対象物輝度と輝度差弁別閾との差を基本とする関数と、上式のような、対象物輝度と輝度差弁別閾との比を基本とする関数が考えられる。本研究では、これらの考えをもとに、より精度よくブライトネスの値を導く定量化式を解析することとした。

3. 4. 2 定量化式算出のためのデータを得る実験

ブライトネスの定量化式を求めるためには、その解析に用いるデータ、すなわち対象物輝度と輝度差弁別閾、およびブライトネスの値のデータが必要である。このようなデータの一つには、ブライトネスの尺度のデータがある。すなわち、3. 3節で求めたブライトネスの尺度の条件に対して、ブライトネスと対象物輝度と輝度差弁別閾の値の組合せデータを求めることができる。表3-1にデータを示す。表3-1からブライトネスの定量化式を求めるためのデータセットが得られた。しかし、このデータは、それぞれ順応条件が異なる条件のデータであり、より実用的な定量化式を解析するためにはこれだけでは十分とはいえない。さまざまな順応条件に対して、一定のブライトネスとなるための対象物輝度の値や、あるいは一定の順応条件に対して、さまざまなブライトネスとなるための対象物輝度の値が必要である。このため、それらのデータを得るための観測実験を行なった⁽⁵⁵⁾⁽⁵⁶⁾。

表3-1 基準尺度におけるブライトネスと対象物輝度

ブライトネス	対象物輝度	ブライトネス	対象物輝度	ブライトネス	対象物輝度
1	3.8cd/m ²	11	400cd/m ²	21	3000cd/m ²
2	10	12	500	22	3600
3	20	13	640	23	4200
4	37	14	800	24	4900
5	61	15	1000	25	5600
6	93	16	1200	26	6300
7	134	17	1500	27	7200
8	183	18	1800	28	8000
9	244	19	2300	29	8800
10	320	20	2600	30	10000

3. 4. 2. 1 定量化データを得るための実験1

実験は、明るさの比較基準とする、ある明るさの対象物を含む視野（基準視野と呼ぶ）と、それと異なる条件のテスト視野とを交互に観測者に提示し、観測者に基準視野の対象物の明るさに比べてテスト視野の対象物の明るさが「明るい」か「暗い」か「等しい」かを答えさせ、それらの回答結果から等しい明るさと判断するためのテスト視野の対象物輝度を求める恒常刺激法を用いた。

(1) 実験装置

図3-10に実験装置の概要を示す。LB1は対象物の周辺視野の輝度（ L_s ）を与える面光源で、観測者からみた大きさは視角寸法が直径 20° の円形とした。LB2は対象物の輝度（ L_o ）を与える面光源で、視角寸法が 2° の円形とした。MはLB2の光源の像を観測者に提示するためのミラーである。Cは L_s および L_o の輝度の制御、ならびにそれらの提示タイミングを制御するための制御装置である。実験者はLB1とLB2の輝度を種々に設定することによって、基準視野とテスト視野を提示した。

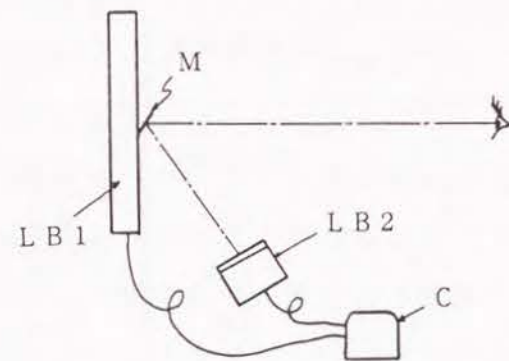


図3-10 実験装置の概要

(2) 実験条件

基準視野とテスト視野および観測者の条件を以下のようにした。

(a) 基準視野

対象物 大きさ・・・ 2° （円形）

輝度・・・60, 320, 1000, 2600, 5500 cd/m^2

（5条件、ブライトネスの尺度において、5～25

に相当する輝度）

周辺視野 大きさ・・・ 20° （円形）

輝度・・・61 cd/m^2 （一定）

提示時間・・・10秒、明順応時は5分以上

(b) テスト視野

対象物 大きさ・・・ 2° （円形）

輝度・・・可変（基準視野の対象物の明るさに比べて十分に明るいとは判断される輝度から十分に暗いとは判断される輝度までの範囲内の7段階の輝度を設定）

周辺視野 大きさ・・・ 20° （円形）

輝度・・・0, 300, 1000, 3000, 5000 cd/m^2 （5条件）

提示時間・・・1秒

(c) 観測者 3名

観測者に提示した基準視野、テスト視野の概略を図3-11に示す。

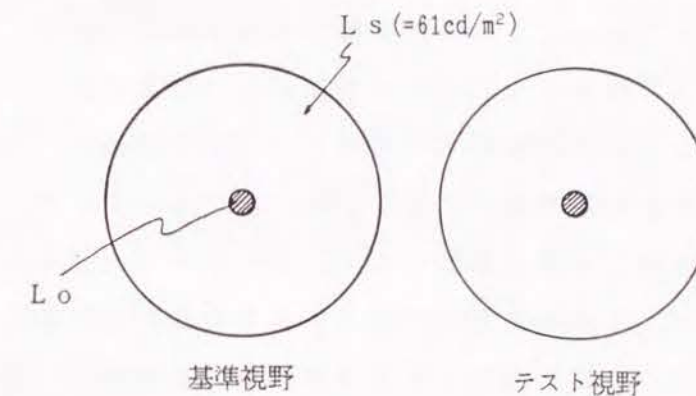


図3-11 観測者の視野（基準視野とテスト視野）

(3) 観測

以下に観測手順を示す。

1) 観測者を15分間はぼ暗黒の視野に暗順応させた。

2)観測者に、ある対象物輝度に設定した基準視野を提示し、その視野に5分間順応させた。

3)観測者に、周辺視野輝度と対象物輝度をそれぞれある輝度に設定したテスト視野を1秒間提示し、基準視野の対象物の明るさに比べて、テスト視野の対象物が「明るい」か「暗い」か「等しい」かを回答させた。

4)観測者に、2)と同じ基準視野を10秒間提示した。

5)3)4)の手順をテスト視野の対象物輝度だけを7段階の輝度の中からランダムに変化させて繰り返した。テスト視野の同じ対象物輝度に対する観測を10回繰り返した。

6)テスト視野の周辺視野輝度、基準視野の対象物輝度を変化させ、2)から5)の手順を繰り返した。

(4) 結果

以上の観測結果から、各観測者が50%の確率でテスト視野の対象物が「明るい」と判断したときの輝度と、50%の確率で「暗い」と判断したときの輝度を求め、それらの相乗平均をその観測者がちょうど「等しい」と判断するときのテスト視野の対象物輝度とした。この解析を種々の基準視野の条件、テスト視野の周辺視野の条件に対して行なった。さらに各観測者の結果の差が小さかったため、それぞれの条件に対して3名の観測者の結果の平均値を求めた。

このようにして求めた結果を表3-2に示す。表において、第1列目はブライトネスの値(今回の実験では基準視野として、それぞれブライトネスの尺度の視野条件を設定したので、それぞれあるブライトネスの値の条件を比較基準として提示したと考えられる)、第2列目は基準視野の周辺視野輝度、第3列目は基準視野の対象物輝度を示す。第4列目はテスト視野の周辺視野輝度、第5列目は基準視野の対象物と等しい明るさに感じられるためのテスト視野の対象物輝度を示す。今回の実験から表3-2に示すブライトネスの定量化式を導くためのデータが得られた。

表3-2 定量化データを得るための実験1の結果

ブライトネス	基準視野の輝度[cd/m ²]		テスト視野の輝度[cd/m ²]	
	周辺視野	対象物	周辺視野	対象物
5	60	60	0 300 1000 3000	40 154 364 900
10	60	320	0 300 1000 3000	259 353 545 1034
15	60	1000	0 300 1000 3000 5000	959 1057 1070 1629 1842
20	60	2600	0 300 1000 3000 5000	2220 2682 2735 3154 3268
25	60	5500	0 300 1000 3000	5309 5474 5646 5492
30	60	10000	0 300 1000 3000	9827 9802 9858 9902

次に、各基準視野およびテスト視野に対して、その視野に順応したときの輝度差弁別閾を第2章で示した輝度差弁別閾の計測方法を用いて算出した。これらの計算結果と実験結果をもとに、ブライトネスをパラメータとして、対象物輝度と輝度差弁別閾との関係を求めた。その結果を図3-12に示す。図から対象物輝度が高く、ブライトネスの値が大きい場合には、ブライトネスの値はおもに対象物輝度によって決まること、またブライトネスの値が小さい場合ほど輝度差弁別閾の影響を強く受ける傾向があることが明らかになった。

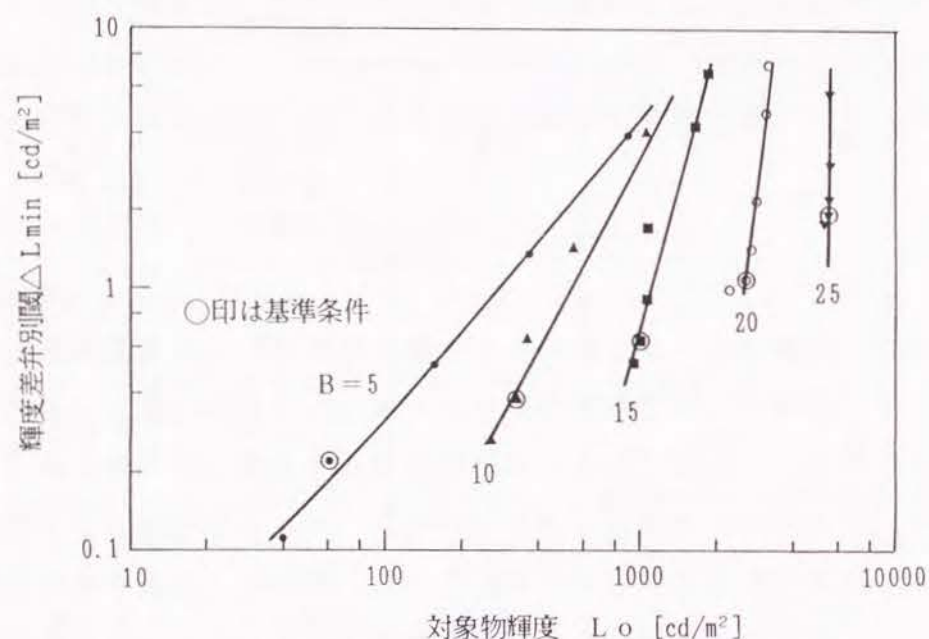


図3-12 対象物輝度と輝度差弁別閾との関係
(ブライトネスをパラメータとして)

3. 4. 2. 2 定量化データを得るための実験2

実験2では、周辺視野の輝度が異なる極端な条件として、輝度の有無によるブライトネスの変化を定量化式に反映するため、明るさの比較基準として、対象物以外がほぼ暗黒な視野を基準視野として提示した。この基準視野と、ある輝度条件の周辺視野を有するテスト視野とを交互に観測者に提示し、観測者に基準視野の対象物の明るさに比べてテスト視野の対象物の明るさが「明るい」か「暗い」か「等しい」かを答えさせ、それらの回答結果から等しい明るさと判断するためのテスト視野の対象物輝度を求めた⁽⁵⁷⁾⁽⁵⁸⁾。

(1) 実験装置

実験装置は前述の実験と同様の装置を用いた。

(2) 実験条件

基準視野とテスト視野および観測者の条件を以下のようにした。

(a) 基準視野

対象物 大きさ・・・2° (円形)

輝度・・・約60, 320, 1200 cd/m²

周辺視野・・・ほぼ暗黒

提示時間・・・10秒、明順応時は5分以上

(b) テスト視野

対象物 大きさ・・・2° (円形)

輝度・・・可変 (基準視野の対象物の明るさに比べて十分に明るいとは判断される輝度から十分に暗いとは判断される輝度までの範囲内の7段階の輝度を設定)

周辺視野 大きさ・・・20° (円形)

輝度・・・3, 30, 300 cd/m²

提示時間・・・1秒

(c) 観測者 3名

観測者に提示した基準視野、テスト視野の概略を図3-13に示す。

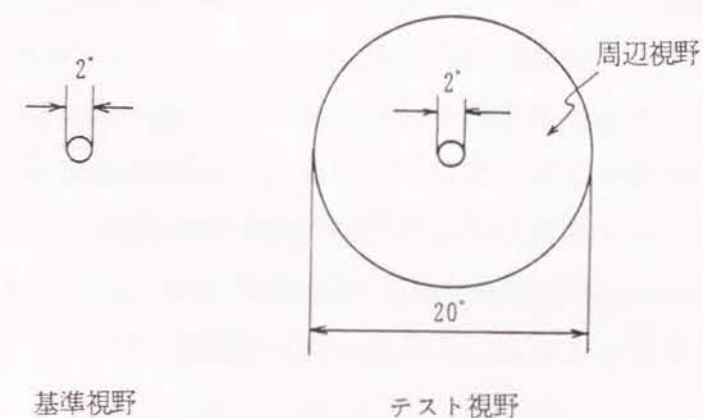


図3-13 観測者の視野 (基準視野とテスト視野)

(3) 観測

以下に観測手順を示す。

- 1) 観測者を15分間ほぼ暗黒の視野に暗順応させた。
- 2) 観測者に、ある対象物輝度に設定した基準視野を提示し、その視野に5分間順応させた。
- 3) 観測者に、周辺視野輝度と対象物輝度をそれぞれある輝度に設定したテスト視野を1秒間提示し、基準視野の対象物の明るさに比べて、テスト視野の対象物が「明るい」か「暗い」か「等しい」かを回答させた。
- 4) 観測者に、2)と同じ基準視野を10秒間提示した。
- 5) 3)4)の手順をテスト視野の対象物輝度だけを7段階の輝度の中からランダムに変化させて繰り返した。テスト視野の同じ対象物輝度に対する観測を10回繰り返した。
- 6) テスト視野の周辺視野輝度、基準視野の対象物輝度を変化させ、2)から5)の手順を繰り返した。

(4) 結果

以上の観測結果から、各観測者が50%の確率でテスト視野の対象物が「明るい」と判断したときの輝度と、50%の確率で「暗い」と判断したときの輝度を求め、それらの相乗平均をその観測者がちょうど「等しい」と判断するときのテスト視野の対象物輝度とした。この解析を種々の基準視野の条件、テスト視野の周辺視野の条件に対して行なった。さらに各観測者の結果の差が小さかったため、それぞれの条件に対して全観測者の結果の平均値を求めた。

このようにして求めた結果を表3-3に示す。表3-3において、第1列目と第2列目はそれぞれ基準視野の周辺視野輝度と対象物輝度を示す。第3列目と第4列目はそれぞれテスト視野の周辺視野輝度と対象物輝度を示す。この表の基準視野とテスト視野のそれぞれに対して、その視野に順応したときの輝度差弁別閾を算出し、対象物輝度とともにブライトネスの定量化式を求めるためのデータとした。

表3-3 定量化データを得るための実験2の結果

基準視野の輝度[cd/m ²]		テスト視野の輝度[cd/m ²]	
周辺視野	対象物	周辺視野	対象物
0	6 5	3	6 6
	6 4	3 0	8 7
	6 4	3 0 0	2 2 0
0	3 2 0	3	3 1 6
	3 3 0	3 0	3 7 0
	3 2 0	3 0 0	6 9 0
0	1 2 0 0	3	1 1 9 0
	1 2 2 0	3 0	1 3 4 0
	1 2 0 0	3 0 0	1 7 0 0

3. 4. 3 定量化式の解析

3. 4. 1節で述べたように、定量化式の構造としては、以下の構造が考えられる。

(a) 対象物輝度 L_o と輝度差弁別閾 ΔL_{min} との差を基本とする式

(b) L_o と ΔL_{min} との比を基本とする式

これらのいずれの構造の式を導くかを検討するにあたって、従来の研究および図3-12に示す実験結果から、ブライトネスの特徴の一つとして、対象物の輝度が高く、ブライトネスの値が大きい、すなわち明るい場合、順応状態が変化しても明るさの変化は少ないことが明らかである。したがって、求めようとする定量化式の構造としては、対象物の輝度が高い場合には、そのブライトネスは対象物輝度によって支配的に決まり、輝度差弁別閾の影響が少ないという性質の式が適切と考えられる。ここで、前者の L_o と ΔL_{min} との差を基本とする式では、上述の性質を有するが、後者の構造の式では、対象物輝度の大小に関わらず、輝度差弁別閾の変化の影響を受けることになり、上述の性質を示すことが困難であると考えられる。このため、本研究では対象物輝度と輝度差弁別閾との差の構造を有

するブライトネスの定量化式を検討することとした。

このような構造をもつ代表的なブライトネス (B) の式には、以下の定量化式が報告されている。

1) Stevensらの式⁽¹¹⁾

$$B = a (L_o - L_{th})^n \quad (3-3)$$

ここで、 L_o : 対象物輝度

L_{th} : 閾値

a, n : 順応状態によって変化する定数

2) Bodmannらの式⁽¹⁸⁾

$$B = a L_o^n + b L_i^n + c \quad (3-4)$$

ここで、 L_o : 対象物輝度

L_i : 観測者が順応していた均一視野の輝度

a, b, c, n : 定数

二つの式を比較すると、Stevensらの式では閾値だけでなく、定数も順応状態に応じて変化するのに対して、Bodmannらの式では、順応状態に応じて変化するのはいくつの変数のみという比較的簡単な式である。すなわちブライトネスの定量化式として実用性が高いという特長がある。したがって本研究のブライトネスの定量化式は、Bodmannらの式に類似した式を検討することとした。

この場合、Bodmannらのように、ブライトネスを対象物輝度と均一視野輝度との関数とすると、実際の視野のような輝度分布が不均一な視野に順応している場合には、まずその視野に順応しているときと順応状態が等価な均一視野の輝度を求める必要がある。ここで、均一視野輝度と輝度差弁別閾との間には一定の関係が成立することから、本研究では均一視野輝度の代わりに、輝度差弁別閾を用いることとした。すなわち、ブライトネスの定量化式としては以下の関数を検討した。

$$B = a L_o^n + b \Delta L_{min}^n + c \quad (3-5)$$

ここで B : ブライトネス

L_o : 対象物輝度

ΔL_{min} : 輝度差弁別閾

a, b, c, m, n : 定数

ここで、Bodmannらの式では m と n は等しい値であったが、均一視野輝度と輝度差弁別閾とは非線形の関係であることから、 m と n とは異なる値と考えられる。また、従来の研究から m の値としては $0.3 \leq m \leq 0.5$ の範囲が考えられる。また、たとえば図2-15に示す均一視野輝度と輝度差弁別閾との関係から $m < n$ となることが考えられる。

以上の考えをもとに、表3-1, 2, 3に示すデータから得られるブライトネスと対象物輝度、輝度差弁別閾との関係のデータを用い、もっともそれらのデータと合致し、かつ簡易な定量化式となるための5つの定数 (a, b, c, m, n) の値を求めた。

その結果、以下のブライトネス (B) の定量化式を導いた⁽⁶⁾。

$$B = 1.2 (L_o^{0.4} - 3 \Delta L_{min}^{0.7}) \quad (3-6)$$

L_o : 対象物輝度 [cd/m²]

ΔL_{min} : 輝度差弁別閾 [cd/m²]

ここで、ブライトネスの尺度とした表3-1のデータに対して、ブライトネスの尺度の値と、尺度の条件に対して上式を用いて計算して求めたブライトネスの値 (計算値) との関係を図3-14に示す。図3-14からブライトネスの値が比較的に小さい (1.5以下) 場合には、定量化式による計算値と実験結果とがよく一致するが、これに比べてブライトネスの値が大きい場合に計算値の誤差が大きくなる傾向がみられる。この誤差を小さくする方法としては、(3-6)式を多項式などの複雑な式とする方法がある。

しかし、ブライトネスの応用を考えると、定量化式はできる限り簡単な式とすることが重要であり、また、誤差は実用上問題とならない範囲であれば定量化式として活用できる。今回の定量化式は、照明応用を考えた場合にもっとも使用頻度が高いと考えられるブライトネスの値が小さい範囲 ($B \leq 1.5$) での精度が高く、また関数が簡易なことから実用的であるといえる。

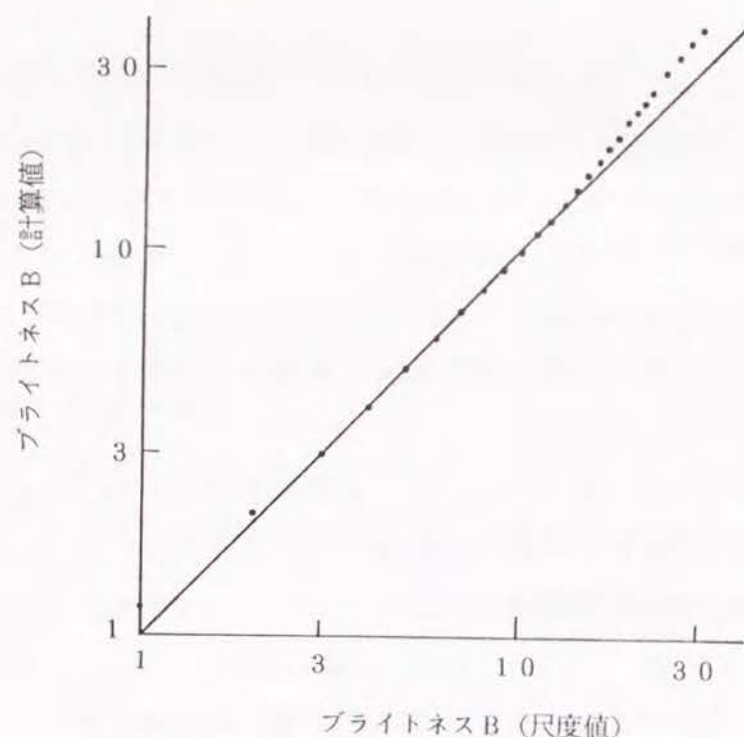


図3-14 ブライトネスの計算値と尺度との対応

3. 5 従来の研究との比較

本研究で求めたブライトネスの定量化式の妥当性を検討する方法として、従来の研究で報告されているブライトネスとの対応関係を検討した。この場合、従来の研究では、観測者の眼を均一、あるいは単純な輝度分布の視野に順応させ、その視野の輝度や視覚閾値と、対象物輝度、ブライトネスの三者の関係を明らかにしている。これに対して本研究のブライトネスの定量化式では、ブライトネスを対象物輝度と輝度差弁別閾との関数として表わしている。ここで、任意の視野に順応しているときの輝度差弁別閾は第2章に示した方法によって求めることが可能である。そこで、従来の研究との対応関係の検討では、まず、それぞれの研究で明らかにされた定量化式に従って、それぞれの研究によるブライトネスの値 (B_o) を算出した。次に、それぞれの実験で用いた視野に順応したときの輝度差弁別閾を第2章の方法によって算出し、この輝度差弁別閾と対象物輝度とから本研究のブライトネスの定量化式を用いてブライトネスの値 (B_a) を算出して、 B_o と B_a とを比較・検討した。

従来の研究には、代表的な研究である Stevensら⁽¹¹⁾の研究と、Bodmannら⁽¹⁸⁾

の研究を選択した (Hopkinson⁽¹⁹⁾の研究も代表的な研究として知られているが、その研究の実験で観測者の順応用に用いた視野のサイズの条件が明確でなく、その視野に対する輝度差弁別閾を正確に求めることができないので、今回の検討からは除いた)。

3. 5. 1 Stevensの結果との関係

対応関係を検討する条件として、対象物輝度 L_o と観測者が順応していた視野の輝度 L_1 をそれぞれ次のように設定した。

$L_o \cdots 1, 10, 100, 1000 \text{cd/m}^2$ の4条件

$L_1 \cdots 1, 10, 100, 1000 \text{cd/m}^2$ の4条件

これらの条件に対して、下記のStevensらの定量化式を用いて、それぞれを組み合わせた条件での対象物の明るさ ϕ を算出した。

$$\phi = k (L_o - L_{th})^n$$

ここで、 k , L_{th} , n は L_1 によって決まる値である。

次に、Stevensらが観測実験に用いた順応用の視野の条件を考えると、視角寸法が直径 5.7° の円形であり、観測者をその視野の輝度に十分に順応させた後、その視野の輝度をほぼゼロにして対象物を提示している。そこで、このような順応条件で視野の輝度が上記の L_1 の値となるときに輝度差弁別閾を、第2章に述べた方法を用いて求めた。このようにして求めた輝度差弁別閾の値を用い、 L_o と L_1 とを組合せた条件それぞれについて、本研究の定量化式を用いて、ブライトネス B_a を算出した。

以上の計算結果から、 ϕ と B_a との関係を求めた。その結果を図3-15に示す。図から、 L_1 の条件によって多少のバラツキはあるが、 ϕ と B_a との間にはほぼ一定の相関関係があることが確認できた。

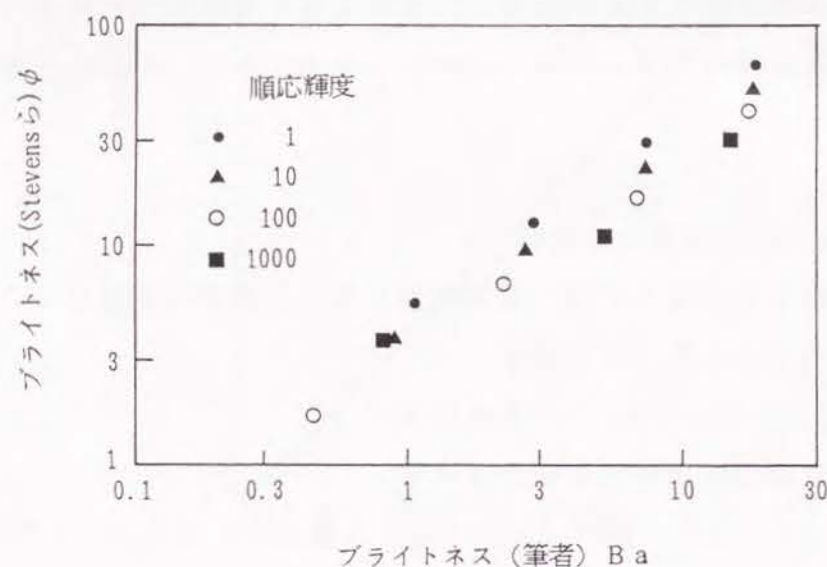


図3-15 Stevensらの結果との対応

3. 5. 2 Bodmannらの結果との関係

対応関係を検討する条件として、対象物輝度 L_o と観測者が順応していた視野の輝度 L_u をそれぞれ次のように設定した。

L_o . . . 3, 10, 30, 100, 300, 1000, 3000, 10000 cd/m^2 の 8 条件

L_u . . . 0, 3, 30, 300, 1000, 3000 cd/m^2 の 6 条件

これらの条件に対して、下記のBodmannらの定量化式を用いて、それぞれを組み合わせた条件での対象物の明るさ $B B$ を算出した。

$$B B = a L_o^{0.31} - a (b \cdot L_u^{0.31} + c)$$

ここで、 $a = 22.969$, $b = 0.24481$, $c = 0.07186$ である。

次に、Bodmannらが観測実験に用いた順応用の視野の条件を考えると、視角寸法が直径 180° の円形であり、観測者をその視野の輝度に十分に順応させ、その視野の中央に対象物を提示している。そこで、このような順応条件で視野の輝度が上記の L_u の値となるときの輝度差弁別閾を、第2章に述べた方法を用いて求めた。このようにして求めた輝度差弁別閾の値を用い、 L_o と L_u とを組み合わせた条件それぞれについて、筆者の定量化式を用いて、brightness $B a$ を算出した。

以上の計算結果から、 $B B$ と $B a$ との関係求めた。その結果を図3-16に示す。図から、 L_u の条件、すなわち観測者の順応状態が異なるにも関わらず、 $B B$ と $B a$ との間には一定の相関関係があることが確認できた。

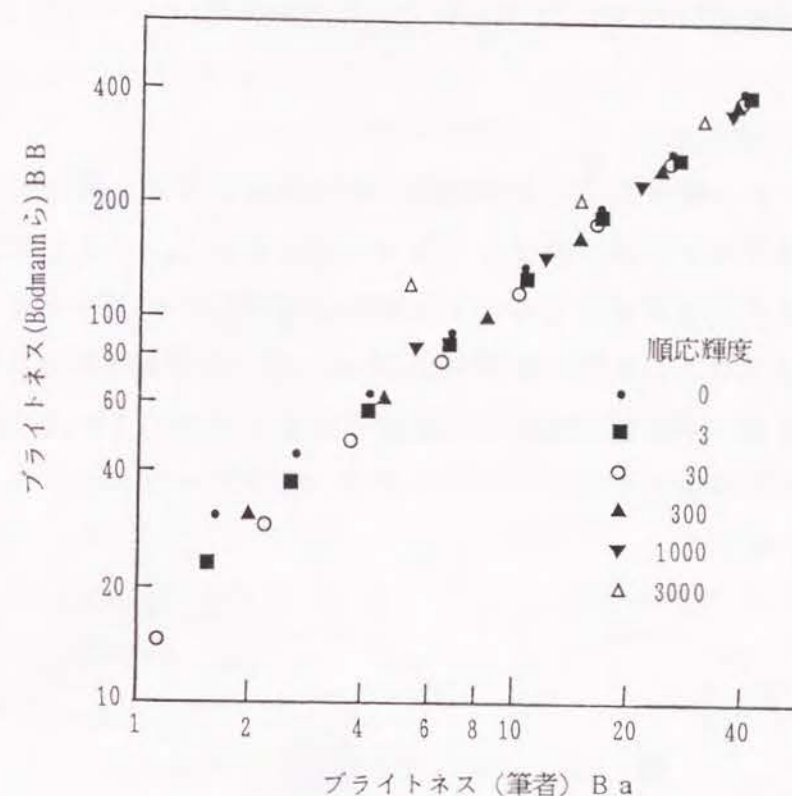


図3-16 Bodmannらの結果との対応

以上の従来の研究結果との対応関係の解析結果から、本研究で明らかにしたbrightnessの定量化式は妥当であることが確認された。

3. 6 対象物に隣接する背景輝度の影響

従来からHeinman⁽⁶²⁾によって、対象物の明るさが、それに隣接する背景によって強い影響を受けるという明るさの対比効果が報告されている。これによれば、対象物の輝度がそれに隣接する背景輝度に比べて低くなると、対象物が急激に暗く感じられることになる。

いっぽう、筆者のブライトネスの定量化では、対象物の背景輝度が対象物のブライトネスに与える影響は、背景輝度によって生じた等価光幕輝度が輝度差弁別閾を増減させると考えて、その影響を考慮している。そこで、この考えが妥当であるかどうかを実験検討した。

3. 6. 1 実験方法

実験では、ある一定の輝度に中心窩が順応している観測者に、図3-17(a)のように、対象物輝度がある値に設定した条件の基準視野と、(b)のように、対象物に隣接する背景（直接背景と呼ぶ）の輝度が基準視野のそれと異なる輝度条件に設定した試験視野とを交互に提示した。そして、両者の対象物の”明るさ”が等しく感じられるための試験視野の対象物輝度を求めた。それらの結果から、対象物の直接背景輝度による明るさの変化が前述の定量化方法によって適切に考慮できるかどうかを検討した。

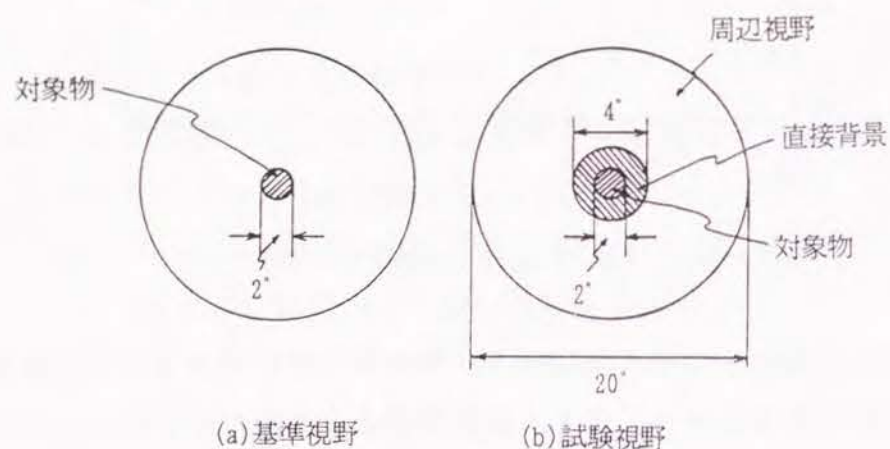


図3-17 観測者の視野

3. 6. 2 実験条件

観測者に提示する基準視野と試験視野は図3-17のように、対象物と直接背景、周辺視野とから構成した。基準視野と試験視野のそれぞれの対象物、直接背景、周辺視野などの条件は次のようにした。

(a) 周辺視野

大きさ・・・直径が外径20°、内径4°の環形

輝度(Ls)・・・10 cd/m²、または100 cd/m²の2条件

(b) 直接背景

大きさ・・・直径が外径4°、内径2°の環形

輝度(Lb)・・・基準視野では周辺視野輝度(Ls)と等しい条件

試験視野では、

Ls = 10 cd/m²の場合、Lb = 5 cd/m²または20 cd/m²

Ls = 100 cd/m²の場合、Lb = 50 cd/m²または200 cd/m²

(c) 対象物

大きさ・・・視角寸法2°（直径）の円形

輝度・・・基準視野の対象物輝度(Lo(ref))は、

Ls = 10 cd/m²の場合、Lo(ref) = 8.6, 37.128 cd/m²

Ls = 100 cd/m²の場合、Lo(ref) = 50, 217.784 cd/m²

のそれぞれ3条件

試験視野の対象物輝度(Lo(test))は実験者が任意に設定できるようにした。

(d) 提示時間

基準視野、試験視野ともに1秒間、提示した。

(e) 観測者

男女計4名

(f) 順応視野

観測者の中心窩を実験中、ほぼ一定の輝度に順応させるため、観測の前順応として、また、試験視野の提示後、次に基準視野が提示されるまでの間、順応視野を提示した。順応視野の大きさは直径20°の円形、輝度は(10または100 cd/m²)とした。

3. 6. 3 実験装置

図3-18に実験装置の概要を示す。実験装置は対象物を提示する光源部Aと、直接背景を提示する光源部B、周辺視野を提示する光源部C、対象物と直接背景と周辺視野のそれぞれの輝度を制御する制御部Dとから構成した。光源A, B, Cの像を2つのハーフミラーで合成することにより、観測者に順応視野、基準視

野、試験視野をそれぞれ提示した。制御部Dは、光源A、B、Cの輝度を調光するとともに、調光の時間を制御し、図3-19に示すタイミングで順応視野、基準視野、試験視野を提示するようにした。順応視野は対象物輝度と直接背景輝度と周辺視野輝度がともに等しい輝度になるように各光源を調光して実現した。

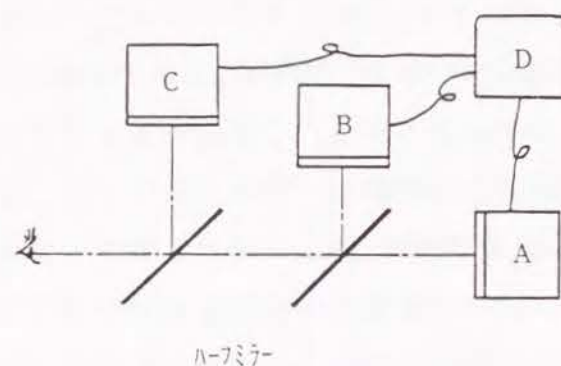


図3-18 実験装置の概要

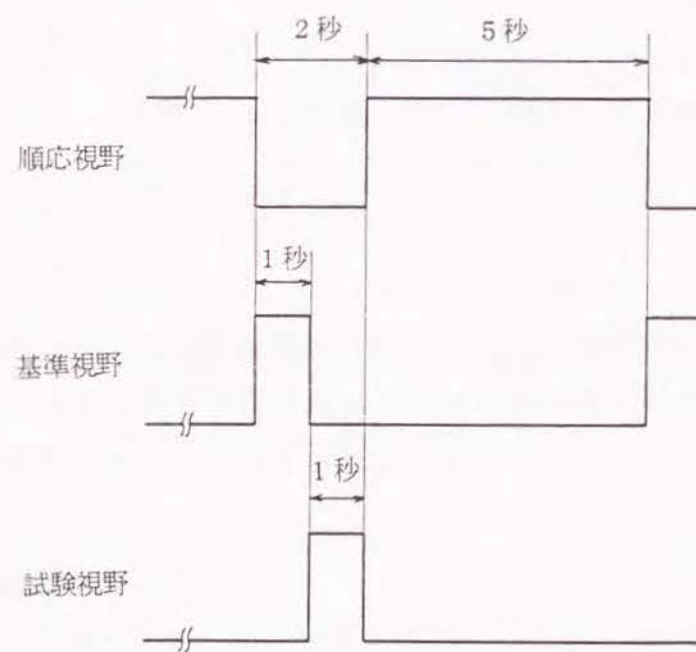


図3-19 刺激(各視野)の提示タイミング

3. 6. 4 実験手順

実験では、以下の手順で観測者に各視野を観測させた。

- 1) 観測者に輝度が 10 cd/m^2 または 100 cd/m^2 の順応視野を提示し、その中心を注視させて5分間順応させた。
- 2) 観測者にある対象物輝度 ($L_o(\text{ref})$) に設定した基準視野を1秒間提示した。
- 3) 基準視野の提示後、すぐにある対象物輝度 ($L_o(\text{test})$) と直接背景輝度 ($L_b(\text{test})$) に設定した試験視野を1秒間提示した。
- 4) 観測者に試験視野の対象物の明るさが、基準視野のそれに比べて”明るい”か、”暗い”か、”等しい”かを回答させた。
- 5) 試験視野の提示後、すぐに再び順応視野を提示し、その視野に観測者を約5秒間順応させた。
- 6) 2)から5)の操作を一つの $L_o(\text{ref})$ と $L_b(\text{test})$ との組み合わせに対して、 $L_o(\text{test})$ の値を、試験視野の対象物の明るさが、基準視野のそれに比べて十分に明るく感じられる条件から暗く感じられる条件まで、段階的にランダムに変化させ、各 $L_o(\text{test})$ の値に対する観測を10回繰り返した。
- 7) 以上の観測を周辺視野輝度 L_s 、 $L_o(\text{ref})$ 、 $L_b(\text{test})$ を種々に変化させ、また観測者を変化させて繰り返した。

3. 6. 5 実験結果

以上の観測結果から、種々の周辺視野輝度、基準視野の対象物輝度、試験視野の直接背景輝度の組み合わせに対して、試験視野の対象物輝度と4名の観測者が基準視野の対象物に比べて、試験視野の対象物「明るい」または「暗い」と判断した確率との関係を求めた。これらの関係から50%の確率でそれぞれ「明るい」、「暗い」と判断する対象物輝度を求め、その相乗平均値を、「等しい」と判断するときの対象物輝度 ($L_o(\text{eq})$) として求めた。以上の結果を表3-4に示す。

次に、基準視野と試験視野のそれぞれを観測したときの観測者の輝度差弁別閾を求め、前節に示したブライトネスの定量化式を用いて、基準視野と試験視野のそれぞれでの対象物のブライトネスを算出した。この場合、直接背景輝度がブライトネスに及ぼす影響は、それによる等価光幕輝度の影響として輝度差弁別閾の値に含めた。結果を表3-5に示す。表3-5から、基準視野の対象物のブライ

表3-4 直接背景輝度による影響の実験結果

順応視野 [cd/m ²]	基準視野[cd/m ²]			試験視野[cd/m ²]		
	周辺視野	直接背景	対象物	周辺視野	直接背景	対象物
100	100	100	50	100	50	53
			50	100	200	58
			217	100	50	215
			217	100	200	220
			784	100	50	760
			784	100	200	780
10	10	10	8.61	10	5	8.2
			8.61	10	20	9.1
			36.9	10	5	35
			36.9	10	20	39
			128	10	5	124
			128	10	20	140

表3-5 基準視野と試験視野におけるブライトネスの比較

順応視野 [cd/m ²]	基準視野		試験視野	
	対象物輝度	ブライトネス	対象物輝度	ブライトネス
100	50	4.22	53	4.47
	50	4.22	58	4.45
	217	8.68	215	8.77
	217	8.68	220	8.63
	784	15.4	760	15.3
	784	15.4	780	15.3
10	8.61	2.35	8.2	2.32
	8.61	2.35	9.1	2.36
	36.9	4.53	35	4.45
	36.9	4.53	39	4.59
	128	7.73	124	7.75
	128	7.73	140	7.97

トネスの値と試験視野の対象物のブライトネスの値はほぼ等しいことが分かった。このことからブライトネスに与える直接背景輝度の影響は、それが等価光幕輝度に与える影響として考慮することが可能であることが明らかになった。

なお、Heinemanの研究では視角寸法が30分程度の小さい対象物を用いていた。これに対して、今回の実験では視角寸法が2°という比較的大きな対象物を用いた。この対象物の大きさが大きいことが、今回の実験では、Heinemanが示した明るさの対比効果で見られるような背景輝度の強い影響が生じなかったと考えられる。したがって、非常に小さな対象物のブライトネスを求める場合には、等価光幕輝度に加え、直接背景輝度による対比効果を考慮する必要があると考えられる。

[参考文献]

- (11) Stevens J.C., Stevens S.S.: Brightness function: effects of adaptation. J. Opt. Soc. Amer. Vol.53 (1963) 375-385
- (18) Bodmann H.W., Haubner P., Marsden A.M.: A unified relationship between brightness and luminance. Proceedings of CIE Kyoto, CIE Pub. No.50 (1980) 99-102
- (19) Hopkinson R.G.: Adaptation and scales of brightness. Proceedings CIE 14th Session Brussels (1959) 289-297
- (55) Inohara M., Narisada K., Takeuchi T., Yoshimura Y.: Scaling of brightness of an object seen in complex luminance fields. Proc. of CIE 20th Session. (1983) E33
- (56) 宇野智恵子、武内徹二、猪野原 誠、成定康平: 視感輝度の定量化に関する仮説の検討. 昭和59年照明学会全国大会講演論文集 (1984) 119
- (57) Takeuchi T., Miyamae A., Narisada K.: Brightness, adaptation and its scales. Proc. of CIE 22nd Session (1991) 93-96
- (58) 武内徹二、成定康平: ブライトネスの定量化. 平成4年度照明学会全国大会講演論文集 (1992) 81

- (59)武内徹二、橋本健次郎、猪野原 誠：明るさ（視感輝度）の尺度に関する一検討. 昭和57年度照明学会全国大会講演論文集（1982）71-72
- (60)宇野智恵子、武内徹二、猪野原 誠：ブライトネス（旧称：視感輝度）の尺度の拡張. 昭和60年照明学会全国大会講演論文集（1985）86
- (61)Takeuchi T.: The brightness of objects in non-uniform luminance fields. Proc. of CIE 23rd Session (1995)
- (62)Heineman E.G.: Simultaneous brightness induction as a function of inducing and testfield luminances. J. Experimental Psychology. Vol.50. (1955) 89-96

第4章 ブライトネスの計測

4. 1 ブライトネスの計測理論

第3章において、ブライトネスの実用的な尺度と定量化式が明らかになった。本節では、これらの尺度と定量化式をもとにした、ブライトネスの計測理論を整理し、また、実際にその理論に基づいた測定、および観測実験から、理論の実用性を検討した結果を示す。

4. 1. 1 計測理論

ブライトネスは、対象物の輝度と、それを見る人間の目の（輝度）順応状態によって決まる明るさの感覚を数量的に示すものである。したがって、ブライトネスを測定するためには、対象物の輝度と目の順応状態に対応する「量」を測定する必要がある。本研究では、後者の「量」として、輝度差弁別閾を用いる。

ここで、実際の複雑な輝度分布を有する視環境を含め、様々な視環境での輝度差弁別閾の値は、第2章で示した輝度差弁別閾の計測方法によって求めることができる。これより、ブライトネスは、対象物の輝度と輝度差弁別閾とを測定し、それらから（3-6）の定量化式を用いて演算することによって計測できる。図4-1にブライトネスの計測プロセスのブロック構成を示す。

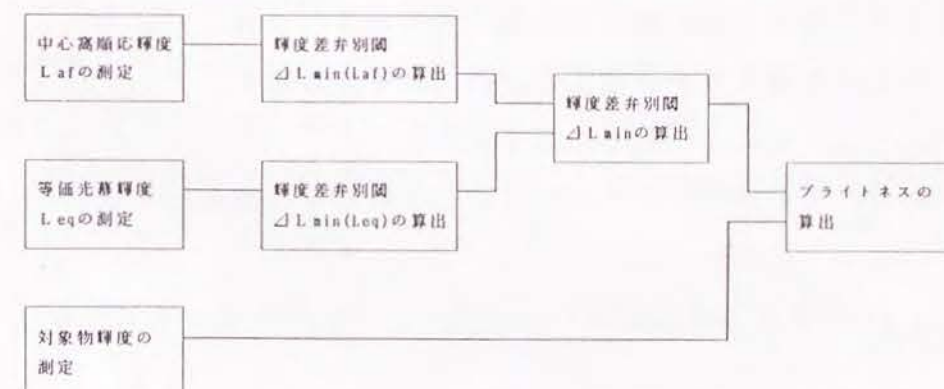


図4-1 ブライトネスの計測プロセス

ブライトネスを計測するためには、まず対象物の輝度（以下、対象物輝度と呼ぶ）と、観測者の網膜中心窩が順応している輝度（以下、中心窩順応輝度と呼ぶ）、対象物を注視したときの周辺視野の輝度による等価光幕輝度の3つの輝度を測定する必要がある。このうち、対象物の輝度は通常の輝度計によって測定できる。中心窩順応輝度は、たとえば対象物を十分に注視している場合は、その対象物輝度と等しいと考えることができるが、視野内の様々な部分に視線を移動させているときの中心窩順応輝度については、第2章の2.3節で示したように、順次注目した対象物の輝度と注視時間の積の時間平均値から推定することが可能と考える⁽⁵¹⁾。したがって中心窩順応輝度は、輝度計を用いた測定と演算から求められる。また、等価光幕輝度は、単純な輝度分布の視野に対しては、輝度分布を測定し、その結果をMoonら⁽³⁵⁾が示した演算式に代入して算出することができるが、通常の複雑な輝度分布の視野に対する等価光幕輝度は、Fryら⁽⁴⁰⁾が開発した特殊なレンズ系と輝度計を組み合わせることによって物理的に測定できる⁽⁵²⁾。

以上のように、実際の視環境においても対象物輝度、中心窩順応輝度、等価光幕輝度はそれぞれ比較的容易に測定でき、実際の複雑な視野でのブライトネスは以下の手順によって求められる⁽⁶¹⁾。

- 1) 対象物輝度 L_o を測定する。
- 2) 中心窩順応輝度 L_{af} を測定する。
- 3) 等価光幕輝度 L_{eq} を測定する。
- 4) 中心窩順応輝度と輝度差弁別閾との関係（図2-7の曲線B）を用い、 L_{af} からそれに対応する輝度差弁別閾 $\Delta L_{min}(L_{af})$ を読み取る。
- 5) 等価光幕輝度と輝度差弁別閾との関係（図2-8の曲線C）を用い、 L_{eq} からそれに対応する輝度差弁別閾 $\Delta L_{min}(L_{eq})$ を読み取る。
- 6) $\Delta L_{min}(L_{af})$ と $\Delta L_{min}(L_{eq})$ との和を求める。

この和の値が、その視野での目の順応状態に対応する輝度差弁別閾 ΔL_{min} となる。

- 7) L_o と ΔL_{min} の値から次式を用いて、ブライトネスの値 B を算出する。

$$B = 1.2 (L_o^{0.4} - 3 \Delta L_{min}^{0.7})$$

4. 1. 2 検証実験

以上により、ブライトネスの計測理論が確立された。ただし、この理論は、実験室内での比較的単純な視野条件に対して行なわれた観測実験の結果をもとにしている。したがって、この理論の実用性を確認するためには、実際の複雑な視環境の条件に対して、理論の妥当性を検証する必要がある。このためには、実際の視環境において、この理論によって求めたブライトネスの値が、実際に観測して感じられる明るさの感覚と対応することを明らかにする必要がある。そこで、実際の視環境の条件において、上述の計測理論に従って対象物のブライトネスを測定するとともに、同じ条件の対象物の明るさを観測によって求める実験を行なった⁽⁶¹⁾。以下に、その測定および観測実験とそれらの結果を示す。

4. 1. 2. 1 屋外照明視環境での検証実験

(1) 測定および観測実験の条件

理論の妥当性を検証するための視環境としては、対象物を観測するときの観測者の目の順応状態が様々な条件が設定される必要がある。また、対象物の輝度も様々な条件に設定される必要がある。今回の検討では、まず、視野内の輝度の変化が大きい昼間の屋外の視野を視環境として選んだ。この場合、目の順応状態を様々な条件に変化させるため、視野内の輝度分布が異なる視環境の条件を選択した。具体的には、晴天時のトンネルの入口付近に対象物を配置し、それをトンネル外部から観測する条件を設定し、その時の対象物のブライトネスの測定と、その対象物の明るさを観測実験によって求めることとした。この場合、観測者にトンネル入口から様々な距離の位置から観測を行なわせることによって観測者の視野の輝度分布をさまざまに変化させ、目の順応状態が様々な条件に設定できるようにした。また、対象物の照度がトンネル入口からの距離によって変化することを利用して、様々な対象物輝度の条件を設定した。実験に用いた視野の一例を図4-2に示す。



図4-2 実験に用いた視野の一例

(2) ブライトネスの測定方法

ブライトネスは前節で示した手順に従って測定・計算して求めた。この場合、対象物輝度、中心窩順応輝度、等価光幕輝度はそれぞれ以下のようにした。

1) 対象物輝度: 対象物の輝度 L_o は、視標位置での鉛直面照度 E_v を測定し、 E_v と対象物の反射率 ρ とから、次式により求めた。対象物の反射率 ρ は、実測値 ($\rho = 0.15$) を用いた。

$$L_o = E_v \cdot \rho / \pi \quad (4-1)$$

対象物位置での鉛直面照度には、観測評価時に測定した対象物の中央部(地上高さ70[cm])の照度を用いた。対象物位置での鉛直面照度は対象物の左右の中央線上、地上から30、70、100[cm]の3箇所で測定したが、3箇所の測定値のばらつきが小さかったので、対象物の中心、地上70[cm]の位置での測定値で代表させることとした。

2) 中心窩順応輝度: 観測者は対象物を注視して、対象物の明るさを判断するため、この場合の中心窩順応輝度は対象物の輝度とした。

3) 等価光幕輝度: Fryらが開発した人間の眼の眼球内散乱と近似した角特性を有するグレアレンズを輝度計の前面に装着した等価光幕輝度計により測定した。

以下に今回の実験条件を示す。

(a) 対象物 大きさ・・・縦140cm、横170cmの無彩色色票(反射率15%)を30m、50m、100mの距離から観測

提示時間・・・無制限

輝度・・・約30～4000cd/m²

(b) 中心窩順応輝度・・・約30～4000cd/m²

(c) 等価光幕輝度・・・約8～190cd/m²

(d) トンネル内部の照明条件・・・3条件

(e) 観測者・・・計13名

(3) 明るさの観測評価方法

主観的な明るさを観測して求める方法としては、たとえば観測者が感じた明るさの程度を直接に数値で回答する直接評価法があるが、この方法は観測者が十分な訓練をすることが必要である。これに代わる比較的簡易な方法として、明るさの判断基準となる視標を与え、これとの比較によって数値を観測者に回答させる方法がある。今回の観測では、後者の方法を用いることとした。この場合、比較の基準としては、ブライトネスの尺度の観測条件を考慮し、反射物体の明るさの基準として活用されているマンセル・バリューを応用し、種々のバリューの灰色色票を、明るさの比較基準の視標として用いた。図4-3に比較基準を示す。

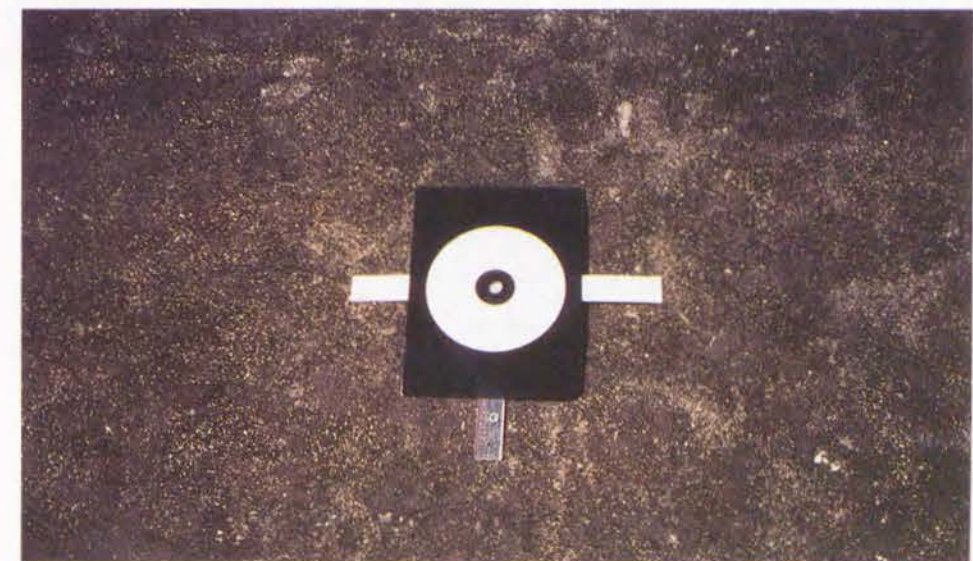


図4-3 ブライトネスの比較基準

観測者は、比較基準の視標のバリュー（明度）を変化させながらトンネル内の対象物の明るさと比較基準の視標の明るさを比較し、トンネル内の対象物と等しい明るさに感じられる比較基準の視標のバリューを回答した。

（４）実験結果と結論

実験ではトンネル内の３種類の照明レベルごとに２回ずつ計６回の測定、観測評価を行った。同じ照明レベルの条件でも、トンネル外部の輝度条件が異なるので、それぞれが異なる視野条件の実験として結果を整理した。

観測者がトンネル内の対象物の明るさと比較基準の視標の明るさを比較し、トンネル内の対象物と等しい明るさに感じられると回答した比較基準の視標のバリューを求め、その平均値をブライトネスの評価結果とした。また、観測と並行して観測評価時の対象物のブライトネスを、前節に示した方法により測定した。

以上のブライトネスの測定および観測データのうち、観測時の比較基準面での照度がほぼ一定と考えられる条件のときのデータを抽出し、ブライトネスの測定値と明るさの評価値（比較基準値とする）との関係を求めた。これは比較基準の視標の照度が変わると、視標の明るさが変わるので、同じバリューであっても感じられる明るさが異なるためである。結果を図４－４に示す。

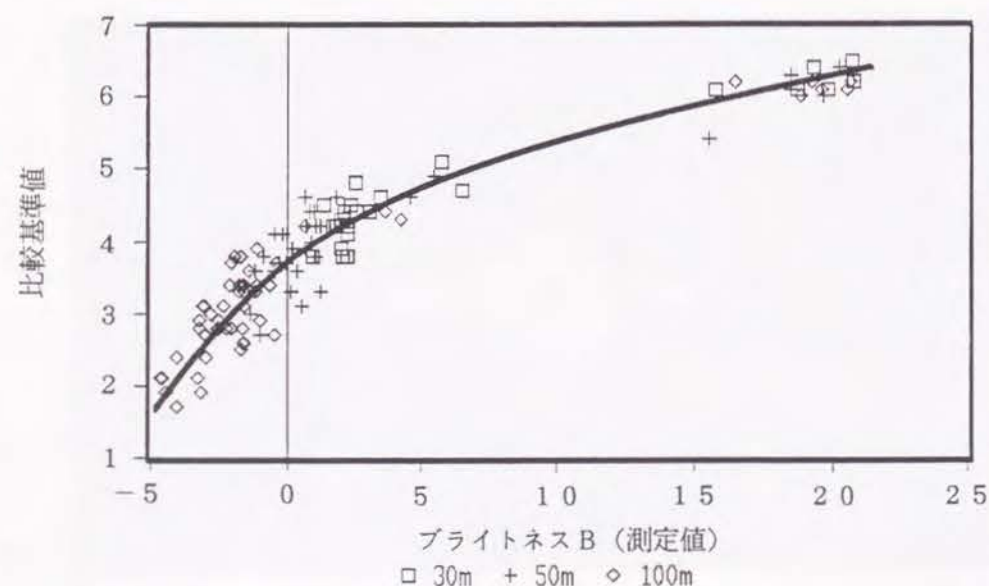


図４－４ ブライトネス（測定値）と比較基準値（観測値）との関係

図４－４から、ブライトネスの測定値と明るさの評価値には相関があり、今回の実験の範囲では、ブライトネスの測定値が明るさの程度と良く対応する、すなわちブライトネスの計測理論が実用上合理的であることが確認できた。

4. 1. 2. 2 屋内照明視環境での検証実験

（１）測定および観測実験の条件

輝度分布が一様で、視野内の輝度の変化が少ない屋内視環境では、対象物の明るさが対象物輝度によってほぼ決まることがある。しかし、一般の屋内視環境でも、照明用の光源や昼間の窓などの輝度の高いものが視野内にあると、それらによって目の順応状態は強い影響を受ける。この場合、在室者が視線を移動することによって、それらの高輝度のものの視野内での位置が変化して目の順応状態は様々に変化する。このため、対象物の輝度とその明るさが対応しない現象が起こる。そこで、今回の検討では、高輝度の光源が視野内の一部を占める条件が起こる屋内のスポーツ照明施設での視野を視環境として選んだ。また、ブライトネスの測定対象としては、スポーツ施設でのボール（バレーボールやサッカーボールなど）や競技者を想定した。目の順応状態を様々に変化させるため、対象物の周辺視野内に照明用の光源が配置されていたり、あるいは大部分の視野が暗い壁面で占められる状況の視野を選択した。

実験で設定した観測者の位置、視線方向、対象物位置の例を図４－５に示す。

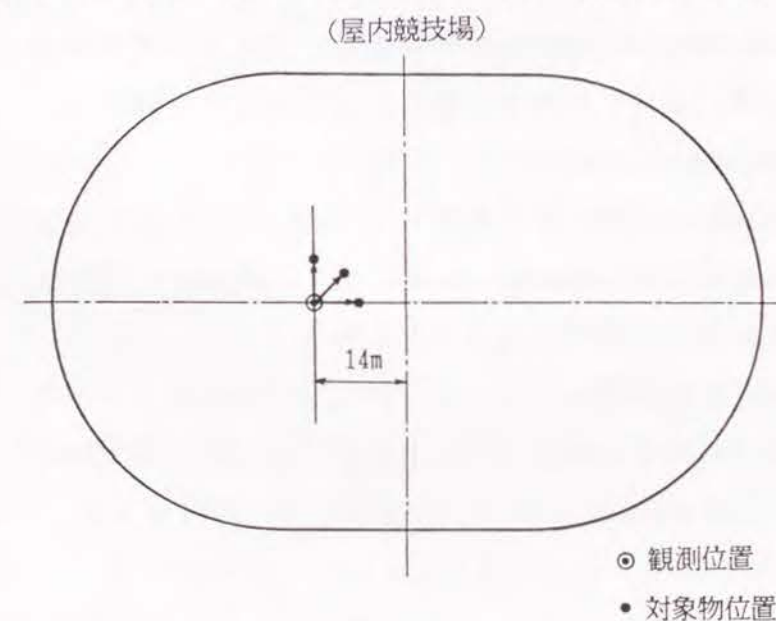


図４－５ 観測、測定の条件（位置、方向）の一例

(2) ブライトネスの測定方法

ブライトネスは4. 1. 1節でしめした手順に従って測定・計算して求めた。この場合、対象物輝度、中心窩順応輝度、等価光幕輝度はそれぞれ以下のようにした。

- 1) 対象物輝度: 対象物の輝度 L_o を輝度計を用いて測定した。
- 2) 中心窩順応輝度: 観測者は視標を注視して、視標の明るさを判断するため、この場合の中心窩順応輝度は視標の輝度とした。
- 3) 等価光幕輝度: Fryらが開発した人間の眼の眼球内散乱と近似した角特性を有するグレアレンズを輝度計の前面に装着した等価光幕輝度計により測定した。

以下に今回の実験条件を示す。

- (a) 対象物 大きさ ・ ・ ・ 視角寸法が直径 2° の円形の無彩色色票
 反射率 ・ ・ ・ 30%と60%の2条件
 提示時間 ・ ・ ・ 無制限
 輝度 ・ ・ ・ 約 $35 \sim 265 \text{cd/m}^2$
- (b) 中心窩順応輝度 ・ ・ ・ 約 $35 \sim 265 \text{cd/m}^2$
- (c) 等価光幕輝度 ・ ・ ・ 約 $5 \sim 21 \text{cd/m}^2$
- (d) 観測者 ・ ・ ・ 6名

(3) ブライトネスの観測評価方法

前述の屋外照明視環境での検証実験と同様に、明るさの判断基準となる視標を与え、これとの比較によって数値を観測者に回答させる方法を用いた。比較基準も同様のものを用いた。

観測者は、比較基準の灰色色票（視標）のバリュー（明度）を変化させながら視標の明るさと比較基準の視標の明るさを比較し、対象物の明るさと等しい明るさに感じられる比較基準の視標のバリューを回答した。

なお、比較基準の視標の明るさが、その照明レベルによって変化するため、比較基準の視標位置での照度を測定し、その照度値がほぼ一定と考えられるときのデータを用いることとした。

(4) 実験結果と結論

以上に述べた対象物のブライトネスの測定結果と観測者の評価結果をもとに、ブライトネスの測定値と明るさの評価値（比較基準値とする）との関係を求めた。その結果を図4-6に示す。

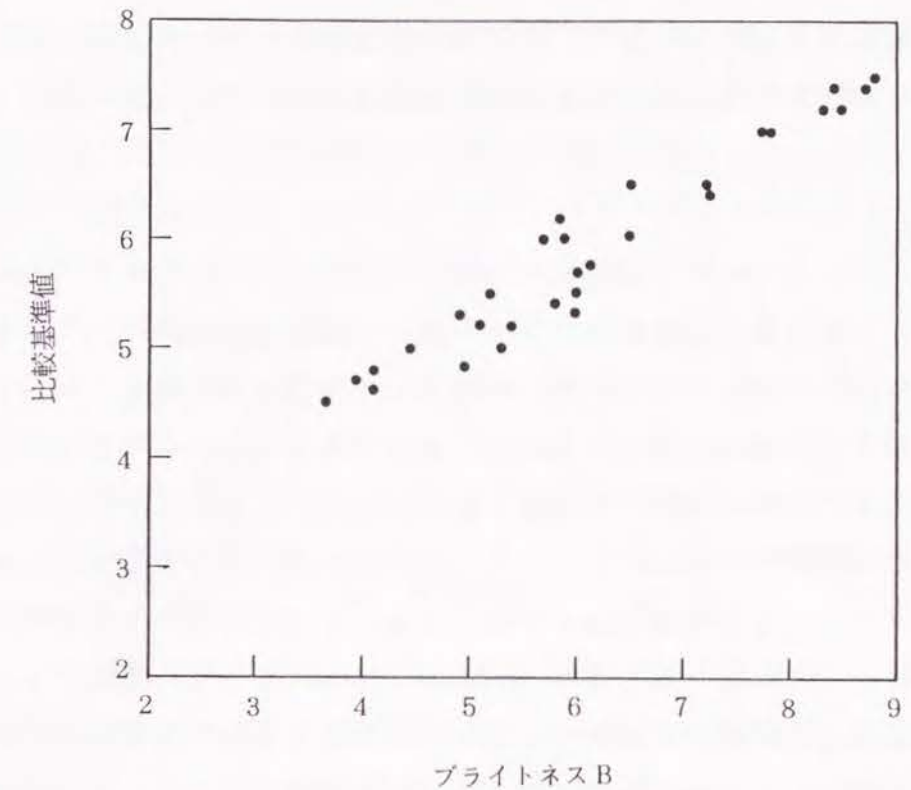


図4-6 ブライトネス（測定値）と比較基準値（観測値）との関係

この図から、ブライトネスの測定値と明るさの評価値には相関があり、今回の実験で用いたスポーツ施設の視環境に対しても、ブライトネスの測定値が明るさの程度と対応する、すなわちブライトネスの計測理論が実用的であることが確認できた。

4. 1. 3 高齢者のブライトネスの一考察

本研究で述べたブライトネスの計測理論、およびその基礎となる順応状態の定量化やブライトネスの尺度はすべて20才代から40才代までの視覚特性に基づいている。いっぽう、近年のわが国では、65才以上の高齢者の人口比率が増大

し、様々な分野で高齢者対策が重要課題となってきた。照明技術の分野においても高齢者に適応した照明視環境の実現に向けて、まず高齢者の視覚特性の研究が国内外で進められている。

本研究で対象とした「ブライトネス」についても、将来の高齢者に適応する照明環境の構築のためには、高齢者の視覚特性に基づいた「ブライトネス」の理論構築が重要になると考えられる。そこで本節では、これまでの高齢者の視覚特性に関する研究成果をもとに、高齢者のブライトネスの定量化の可能性について述べる。

本研究のブライトネスの定量化の方法としては、ブライトネスの基準となる尺度を定め、その尺度上の数値でブライトネスの値を定めた。そして、ある明るさに感じられる対象物のブライトネスの値は、その対象物と等しい明るさに感じられる基準尺度の対象物のブライトネスの値で数値化した。すなわち、ある対象物のブライトネスは基準尺度との比較で値が決まる。したがって、ブライトネスの値そのものは相対的な値である。しかし、実際に高齢者が基準尺度を観測した場合には、ブライトネスの値が等しい場合でも、その値で感じられる明るさの程度は若年齢者のそれに比べると異なる可能性がある。そこで、従来の研究結果をもとに、高齢者と若年齢者とでブライトネスの各要因に関する視覚特性がどのように異なるかを検討し、高齢者のブライトネスと本研究のブライトネスの差異を考察した。以下にその結果を述べる。

まず、前述したように、ブライトネスは対象物輝度、すなわち対象物から目に到達する光の強さと、目の順応状態によって決まる。この順応状態は、中心窩の感度と等価光幕輝度、すなわち眼球内の光散乱の程度によって支配される。したがって、高齢者のブライトネスを考えるためには、対象物輝度と中心窩の感度、等価光幕輝度のそれぞれについて、高齢者と若年齢者との差異を検討する必要がある。

このうち、対象物輝度の年齢による差異に関しては、加齢とともに角膜や水晶体、硝子体の透過率が低下することが明らかにされている⁽⁵³⁾。このため、高齢者は若年齢者に比べ、網膜に到達する光の量が低下することが考えられる。たと

ば、Corensら⁽⁵⁴⁾の研究によれば、眼球光学系の光学濃度は、30才の人が約0.2に対して60才の人は約0.35であり、60才の人の透過率は30才の人のその約70%である。したがって、対象物輝度に高齢者の眼球光学系の透過率の変化を考慮した、実効的な対象物輝度を求める必要がある。

中心窩の感度そのものについては、年齢による差異はほとんどないことが明らかにされている⁽⁵⁵⁾ので、高齢者の感度は若年齢者のそれと等しいと考えられる。しかし、本研究のブライトネスの計測理論では、中心窩の感度を中心窩が順応していると考えられる輝度（中心窩順応輝度）で数値化している。ここで、加齢に伴い、眼球光学系の透過率が低下するので、これを考慮した中心窩順応輝度の年齢補正を行なう必要がある。たとえば、上述の透過率の差異を用いて、高齢者の中心窩順応輝度は若年齢者の0.7倍とする。

また、2. 2. 3節で示したように、等価光幕輝度は年齢とともに著しく増加することが明らかにされている⁽⁴¹⁾。たとえば、Blackwellら⁽⁵⁶⁾の研究によれば、同じ輝度分布の視野に対して60才の人の等価光幕輝度は30才の人のその約2倍となることが報告されている。したがって、等価光幕輝度の値を2倍とするような年齢補正が必要である。

以上から、今回のブライトネスの計測理論のなかで、対象物輝度と中心窩順応輝度と等価光幕輝度の各要因に対して年齢による補正を施すことにより、年齢によらず、等しい明るさに感じられるものを一定のブライトネスの数値で表わすことが期待される。しかし、これまでの高齢者の視覚特性に関する研究で明らかのように、高齢者の特性には大きな個人差があり、たとえ同じ年齢の人であっても、その特性は大きく異なる場合がある。したがって、上述した補正の値は現時点での研究から考えられる一般的な値であり、厳密には対象となる人間の視覚的な年齢に合った補正をすることが重要である。

また、今回の高齢者のブライトネスの計測理論は、あくまで視覚特性の研究結果をもとにした推測である。したがって、この推測が妥当であるかどうかを、今後、実際に高齢者を観測者に用いた観測実験を行ない検討する必要がある。

4. 2 ブライイトネスの測定

ブライイトネスを照明設計に応用するためには、一つには照明設計の段階、すなわち照明設備が実在しない段階において、対象物のブライイトネスを予測する、あるいは所要のブライイトネスを実現するための輝度や照度などの照明条件を設定できることが必要である。これにはブライイトネスの計測理論をもとに、ブライイトネスの要因である中心窩順応輝度や等価光幕輝度、対象物輝度といった値を設定し、予測解析することが考えられる（これについては第5章に述べる）。

応用のためのもう一つの要件として、ブライイトネスの測定がある。スポーツ照明施設やオフィスビルの照明、道路照明などの大規模な照明施設や公共の施設では、照明施設の完成に対して、その検査として所定の照明条件が確保できているかどうか、輝度や照度を測定し、照明施設の検査が行なわれる。

ブライイトネスを照明設計に応用し、ブライイトネスの値を照明の要件の一つとした場合、照明施設の検査において、従来の照度や輝度と同様に、ブライイトネスを測定し、所要の値が得られているかどうかを確認することが必要である。このためには、照度計や輝度計と同様に、ブライイトネスを測定する計測器が必要である。

そこで、ブライイトネスを測定する計測器を試作した⁽⁶⁷⁾。本節では、試作したブライイトネスの計測器と、それを用いた測定例を示す。

4. 2. 1 測定装置

ブライイトネスの測定は、ブライイトネスの算出要素である対象物輝度、中心窩順応輝度、等価光幕輝度の3つの輝度を測定し、4.1.1節に示した計測理論に従って測定値をもとに演算処理すればよい。

このうち、対象物輝度は、一般の輝度計と同様に、対象物をレンズによって受光素子面に結像させて測定できる。中心窩順応輝度は、厳密には、観測者が順次注目した対象物の輝度とその注視時間を測定し、対象物輝度と注視時間の積の時間平均値から求める必要があるが、これを実現するには極めて複雑な装置が必要となる。しかし、たとえば屋内照明施設で在室者が書類を見たり、人の顔を見ながら対話している場合などのように、比較的、輝度の差異の少ない対象物をそれぞれ十分に注視している場合は、観測者の中心窩は対象物輝度と等しい輝度に順

応していると考えられる。このような視環境は実際の照明環境では少なくないと考えられる。この場合には、対象物輝度の値を中心窩順応輝度の値として用いることが可能であり、中心窩順応輝度を独立して測定する必要がないので、測定装置は簡易化できる。このため、装置の実現性と構造の簡易化を考え、今回のブライイトネスの測定装置では、観測者の中心窩が対象物とはほぼ等しい輝度に順応している条件を対象とした装置を試作することとした。

また、等価光幕輝度は輝度計の対物レンズの前面にグレアレンズ装着して測定できるが、この場合、グレアレンズの光学特性が特殊なため、グレアレンズを通して対象物に輝度計の光軸を調整することが不可能である。このため、今回の装置では、対物レンズによる結像面に特殊な濃度分布をもつ濃度フィルタを配置し、対物レンズの角度特性と濃度分布とを組み合わせることにより、眼球内での光散乱の角度特性と等しい特性を実現することとした。

以上の条件のもとに試作したブライイトネス測定装置の構成を図4-7に示す。

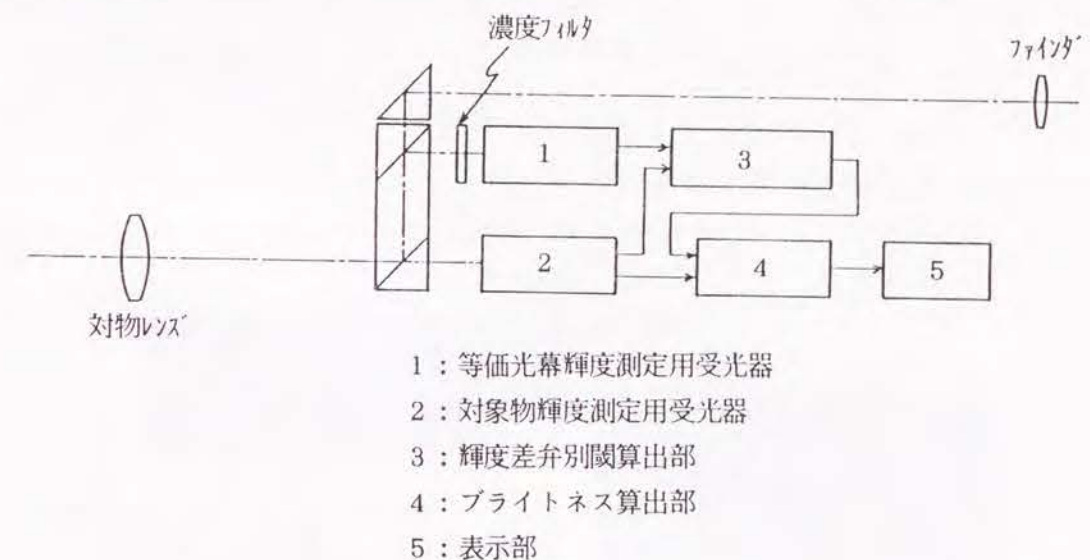


図4-7 ブライイトネス測定装置の構成

図において、対物レンズを透過した光は2つのハーフプリズムで3つの光路に分離され、対象物輝度の測定用の受光器、等価光幕輝度の測定用の受光器、ファインダに入射する。このようにして測定した対象物輝度、中心窩順応輝度（対象物輝度の測定値を流用）、等価光幕輝度の値から、ブライイトネスを演算して求めた。

この場合、中心窩順応輝度の測定値と等価光幕輝度の測定値から輝度差弁別閾を求める計算や、対象物輝度と輝度差弁別閾の値からブライトネスを求める計算を、測定の時、測定装置内で実行することは計算過程が複雑で時間を必要とし、測定装置として実用的でない。

そこで、測定の度に計算するのではなく、あらかじめ対象物輝度と等価光幕輝度との様々な組み合わせ条件（中心窩順応輝度は対象物輝度と等しい）について、ブライトネスの値を算出し、その結果を記憶させたメモリを装置に内蔵させた。そして、対象物輝度と等価光幕輝度のそれぞれの測定値をコード化した信号に変換し、それぞれのコード化信号によって、メモリ内のブライトネスの値を読み出し、表示する演算処理の方法を用いた。測定装置の主な諸元を表4-1に示す。

表4-1 ブライトネス測定装置の諸元

測定項目	対象物輝度 10～1000cd/m ² 等価光幕輝度 3～300cd/m ²
表示項目	ブライトネス
受光素子	シリコンフォトセル (視感度補正済み)
信号処理方式	メモリ読出し方式
計測時間	1秒以内
外形寸法	縦75mm×横300mm×高さ110mm
重量	2.5kg
電源	水銀電池(5.6V)2個使用
消費電力	150mW以下

4. 2. 2 ブライトネスの測定例

ブライトネスの測定装置を用いてオフィスや店舗などの屋内照明施設や、屋外の照明施設でブライトネスを測定した。以下の測定結果を示す。

(1) オフィスでの測定

第1章で事例として紹介したように、昼間の輝度の高い窓を背景として座っている人の顔を見た場合と、同じ人の顔を夜間の輝度の低い窓、あるいはブラインドによって遮光した窓を背景として座っている場合の顔の明るさを比較すると、顔の輝度はほぼ等しいときでも、顔の明るさは異なって見える。この原因は、顔を見ている人の目の順応状態が異なることに原因がある。したがって目の順応状態の影響を考慮しているブライトネスを用いることによって、両者の明るさの差異を数値的に表わすことが可能である。

そこで、昼間の高輝度の窓を背にした人の顔と、ブラインドで遮光した低輝度の窓を背にした同じ人の顔のそれぞれのブライトネスを測定した。測定結果を図4-8に示す。図のように、窓を背にした人の顔の輝度は等しい場合でも、そのブライトネスは、高輝度の窓を背にした場合は-2.9であるが、低輝度の窓を背にした場合は5.5と、後者の場合のほうが大幅に明るいことがブライトネスの値によって示すことができるようになった(57)。

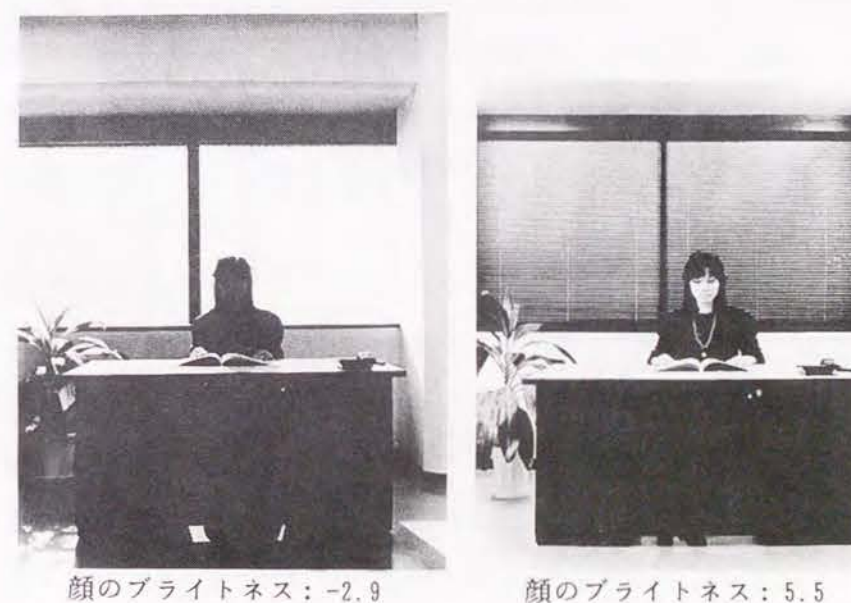


図4-8 窓を背にした人の顔のブライトネス

次に、オフィスでの一つの問題として、照明器具の配光（照明器具から放射される光の方向とその強度の特性）による明るさへの影響がある。近年、VDT機器がオフィス作業に導入されるようになってからは、VDTの画面に照明器具が移り込んで表示文字を視認しづらくすることを防止するため、発光輝度の低い照明器具が用いられている。しかし、それ以外の空間では、蛍光灯が露出して見える照明器具や、不快グレアを軽減する目的で配光を制御した器具（たとえば、照明器具の直下方向から60度以上の方向の光を照射しないように照明器具の反射板を設計したり、ルーバを取り付けた器具）が用いられている。この場合、前者の露出型の照明器具を使用した室内と、後者のグレアに配慮した照明器具を使用した室内とを比較すると、特に在室者の顔が、前者は顔の照度が高いにもかかわらず明るく感じられないことがある。

そこで、同様の大きさのオフィスで、使用されている照明器具が異なる2室を用い、それぞれの室内での顔のブライトネスと顔面での照度（鉛直面照度）を測定した。図4-9に測定に用いた室の形状と、測定する対象物の位置、測定装置の位置を示す。なお、測定の対象物としては実物の顔を用いず、顔とほぼ反射率が等しい反射率30%の灰色の色票を用いた。また、測定結果を表4-2に示す。

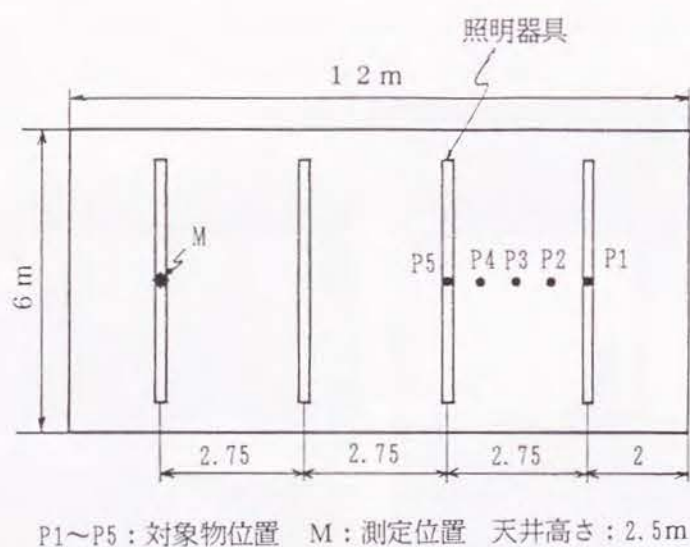


図4-9 ブライトネスの測定条件

表4-2 照明器具の種類による顔のブライトネスの差異

対象物の位置	照明器具A		照明器具B	
	鉛直面照度	ブライトネス	鉛直面照度	ブライトネス
P1	425 [lux]	3.4	240 [lux]	2.8
P2	500	3.7	350	3.6
P3	610	4.1	530	4.4
P4	630	4.2	600	4.7
P5	400	3.2	260	3.7

表より、露出型の照明器具を使用した室内では、比較的に高い顔面照度が得られるにもかかわらず、ブライトネスの値は高いとはいえないことが明らかである。これに対して、グレアに配慮した照明器具を使用した室内では、顔面照度が低くても、露出型の照明器具で高い照度で照明された場合と同程度のブライトネスが得られ、さらに露出型の場合と同程度の顔面照度が得られる位置では、高いブライトネスの値となる、すなわち顔が明るく見えることが定量的に明らかになった。

（2）店舗での測定

店舗のショウウィンドウを見てみると、昼間、周囲が明るいときには展示している商品は人工光だけでなく、自然光によって高い照度で照明されている。これに対して夜間は人工光のみで照明されているので、昼間に比べるとかなり低い照度で照明されている。しかし、商品の明るさを比べてみると、昼間より夜間の方が明るく感じられる。そこで、ショウウィンドウの対象物（女性用衣服）のブライトネスを昼間と夜間の状況でそれぞれ測定し、明るさの差異を検討した。測定

結果を表4-3に示す。

表4-3 ショウウィンドウの対象物

昼 間		夜 間	
対象物輝度	ブライトネス	対象物輝度	ブライトネス
740 cd/m ²	6.0	170cd/m ²	7.7

表より、夜間の対象物の輝度は、昼間の約1/4であるにもかかわらず、ブライトネスでは約1.3倍の値であり、夜間の方が明るく感じられることが数値的に表わることがわかった。また、この測定結果をもとに計算すると、もし夜間の対象物のブライトネスを昼間も得ようとする対象物の輝度を約1.4倍（約1000 cd/m²）の高い輝度になるように、人工照明を増加させる必要があることが明らかになった。

（3）トンネルでの測定

都市内の幹線道路や東名・名神高速道路のような交通量の多い幹線道路を走行しているときには、先行車を注目して、それに追従して走行することが多い。この場合に、昼間、先行車がトンネルに接近し、トンネル内に進入するときの先行車を見ていると、先行車がトンネル外を走行しているときには、それが明るくはっきりと見えているのが、先行車がトンネル内に進入した直後は先行車が極端に暗く見えにくくなる。さらに自分もトンネル内に進入すると先行車は再びやや明るく見えにくくなることを経験する。トンネル内の照明は、トンネルの入口部がもっとも高く、トンネル内部に入るにしたがって低下するように設計・設備されている。このため、先行車の（背面の）輝度はトンネル入口部がもっとも高く、内部に入るに従って低下するはずである。しかし、先行車の明るさは、上述のように、トンネルの入口からやや中に入った位置（高い照明レベルが与えられている）でも暗く感じられる。したがって、前述の先行車の明るさの変化は、先行車の輝度

だけで説明することはできない。そこで、トンネル入口に接近・進入する先行車のブライトネスを測定し、明るさの変化を調べた。

この場合、実際に先行車を走行させ、それに追従して走行しながら先行車のブライトネスを測定することを考えると、先行車がトンネルの入口に進入した後、後続車がトンネルに進入するまでの時間はわずか数秒程度であり、この間に必要なデータを測定することは困難である。このため、今回の測定では、ブライトネスの算出要素である対象物輝度、中心窩順応輝度、等価光幕輝度のそれぞれを、実際に走行しているときの先行車や後続車の位置に測定装置を配置して測定した。次に、それらの測定結果をもとに、ブライトネスの計測理論に従って先行車のブライトネスを算出した。以下に測定の方法、条件を示す。

1) 対象物輝度：対象物輝度として実際の先行車の背面の輝度を測定しても、それはその先行車に固有の輝度であり、一般性がうすれる。また、照度を測定することによって、種々の反射率の先行車に対する対象物輝度が予測しやすい。このため、対象物となる先行車の位置での鉛直面照度（ E_v ）を照度計で測定し、先行車の背面の反射率を20%として次式により、対象物輝度（ L_o ）を算出した。測定位置は、トンネル入口から160mまでの範囲とし、路面上の70cmの位置での鉛直面照度を測定した。また、今回の計算では、自動車の車体の反射率は20%以上のものが多いことから、暗く見え方が問題となりやすい条件を用いた。

$$L_o = 0.2 \times E_v / \pi \quad (4-2)$$

2) 中心窩順応輝度：前節に示したブライトネスの測定装置では、観測者が対象物を十分に注視し、その輝度に中心窩が順応している条件を前提として装置を試作した。しかし、先行車に追従している後続の観測者は、先行車がトンネル外部を走行しているときには、先行車や前方の路面などを注目していることが多い。また、先行車がトンネル内部に進入してから後続車がトンネル内部に進入するまでの時間は数秒以内である。これらから、観測者の中心窩はトンネル外部の高い輝度に順応した状態がほぼ維持されていると考えられる。このため、中心窩順応輝度の値としては、トンネル外部を走行しているときに注目する機会の多い路面の輝度と等しいと考え、トンネル外部の路面輝度を測定し、この値を中心窩順応輝度とした。具体的には、トンネル入口付近の自然光で照明されている路面の輝度

度を輝度計を用いて測定した。

3) 等価光幕輝度: 後続する自動車の運転者の位置から、先行車を注視したときの条件に対する等価光幕輝度を輝度計にグレアレンズを装着した装置で測定した。測定位置は、トンネル入口からトンネル外部へ100mの位置から、トンネル内部へ60mまでの範囲とした。

以上の測定結果をもとに、後続車の運転者が先行車を見たときのブライトネスを算出した。この場合、先行車と後続車の車間距離によって、ブライトネスを計算するときの対象物輝度と中心窩順応輝度と等価光幕輝度との組み合わせが異なる。今回の測定では、車間距離を40m, 60m, 100mの3条件を想定してブライトネスを算出した。ブライトネスの計算結果を、車間距離をパラメータとして図4-10に示す。

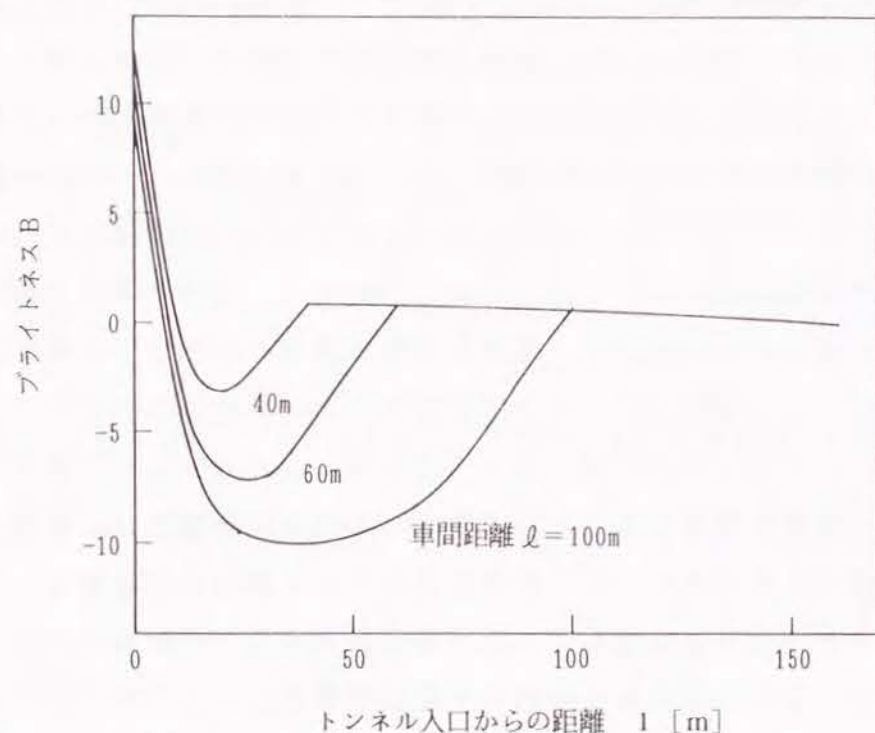


図4-10 先行車のブライトネスの測定結果

図の横軸は先行車の位置であり、トンネル入口からの距離で示す。また、縦軸は先行車のブライトネスである。たとえば、車間距離が60mの曲線で、先行車の位置が30mとは、先行車がトンネル内30mの位置にあり、後続車がトンネルの入口から外に30mの距離の位置にあるときのブライトネスを表わす。図から、

いずれの車間距離の条件に対しても、先行車のブライトネスは、先行車がトンネルに進入すると急激に低下し、やがて徐々に上昇して後続車がトンネルに進入するまで上昇することが明らかになった。これは日常、経験する現象とよく対応する。したがってブライトネスを用いることにより、昼間のトンネル入口付近で生ずる先行車の明るさの変化を定量的に表わすことが可能であることが明らかになった⁽¹⁸⁸⁾。

[参考文献]

- (35) Moon P., Spencer D.E.: The specification of foveal adaptation. J. Opt. Soc. Amer. Vol.33 (1943) 444-456
- (40) Fry G.A., Pritchard B.S., Blackwell H.R.: Design and calibration of a disability glare lens. Illum. Engng. (1963) 120-123
- (41) Vos J.J.: Disability glare - A state of the art report -. CIE Journal Vol.3 (1984) 39-53
- (51) 大竹史郎、武内徹二、吉村義典: 視物質濃度の計算に基づく中心窩順応輝度の予測. 昭和61年電気関係学会関西支部連合大会予稿集 (1986) G362
- (52) 武内徹二、吉村義典、猪野原 誠: 周辺視野の中心視への影響(3) (等価光幕輝度の物理的測定). 昭和51年度照明学会全国大会予稿集 (1976) 46
- (57) Takeuchi T., Miyamae A., Narisada K.: Brightness, adaptation and its scales. Proc. of CIE 22nd Session (1991) 93-96
- (61) Takeuchi T.: Brightness of objects in non-uniform field. Proc. of CIE 23rd Session
- (63) たとえば、Said F.S., Weale R.A.: The variation with age of the spectral transmissivity of the living human crystalline lens. Gerontologia, Vol.3, (1959) 213-231
- (64) Corens S., Girgus J.S.: Density of human lens pigmentation: In vivo measures over an extended age range. Vision Research, Vol.12 (1972) 343

(65)McFarland R.A., Domey R.C., Warren A.B., Ward D.C.:Dark adaptation as a function of age. I. A statistical analysis. J. Gerontol. Vol.15 (1960) 149-154

(66)Blackwell O.M., Blackwell H.R.: Individual responses to lighting parameters for a population of 235 observers of varying ages. J. Illum. Engng. Soc. Vol.2 (1980) 205-232

(67)堀井 滋、重田照明、武内徹二：小形視感輝度計の試作，昭和59年照明学会全国大会講演論文集 120

(68)吉村義典、武内徹二、成定康平：トンネル入口部における先行車のブライトネス，昭和59年交通眼科学会（1984）1

第5章 ブライトネスの照明設計への 応用

第4章までに述べたように、本研究によって、実際の複雑な視環境での対象物のブライトネスを求めることが可能となった。また、本研究によるブライトネスの計測理論を応用することによって、あるブライトネスの値を得るための照明要件（たとえば対象物の輝度やその輝度を実現するための照度など）を解析することが可能となった。

本章では、ブライトネスとその計測理論を実際の様々な照明に応用した例を示し、その効果について述べる。

5. 1 オフィス照明

オフィスでの主要な視対象の一つに机上の書類がある。このため、これまでのオフィス照明では机上の対象物が必要十分な見え方となるように、机上面での水平面照度を確保するように設計されている。書類などの机上の物が対象物である場合、対象物の背景となる視野は書類や机などの反射物体で占められ、特に輝度の高い発光物体はほとんど見られない。このため、対象物輝度も観測者の目の順応状態も作業面付近の照度に対応するので、対象物の明るさもその照度と対応すると考えられる。

しかし、オフィスでの重要な行為の一つとして、オフィス内でのコミュニケーションを計るための同僚や部下などとの会話や、社内外の人との会議がある。これらの場合、人の顔が重要な視対象となる。人の顔を見るとき背景となる視野には、壁面や什器といった反射物体のほかに、窓や照明器具などの輝度の高い光源が入る場合が多い。この場合、4. 2節のブライトネスの測定で示したように、観測者の目の順応状態は窓や照明器具の輝度や視野内での位置によって変化するので、対象物の明るさは対象物の照度や輝度と対応しない場合がある。そこでオ

フィスでの主要な対象物である顔のブライトネスについて検討した。

5. 1. 1 照明器具の特性による顔のブライトネスの変化

前節で示した実際のオフィスでのブライトネスの測定から、オフィス照明に使用する照明器具の種類によって顔のブライトネスに差異が生ずることがわかった。そこで、照明器具による顔のブライトネスの変化を解析した⁽⁶⁹⁾⁽⁷⁰⁾。

顔のブライトネスの要因は顔面輝度と、その顔を見る観測者の中心窩順応輝度、等価光幕輝度である。オフィスでの在室者の顔のブライトネスを考えた場合、まず顔面輝度は顔面での鉛直面照度で決まる。中心窩順応輝度は観測者の視線が視野内の注視した部分の輝度とその注視時間によって決まるが、極端に輝度が高い昼間の窓面やランプなどを注目しない場合には、比較的輝度の高い壁面や書類の輝度によって決まると考えられる。このような場合（これは通常、多く生ずる条件と考えられる）、中心窩順応輝度は 100cd/m^2 程度であり、照明器具の種類による中心窩順応輝度の差異は少ないと考えられる。また、等価光幕輝度は、昼間の高輝度の窓が視野内を占めるような場合を除くと、照明器具から目に入る直射光、壁面や天井面および作業面から目に入る反射光によって決まる。したがって、オフィスの在室者の顔のブライトネスは、対象となる顔面位置での鉛直面照度と顔を見る人の等価光幕輝度によってほぼ決まると考えられる。そこで、昼間の高輝度の窓がない状態を前提として、天井に取り付ける照明器具の配光や配置によって在室者の顔のブライトネスがどの様に変化するかを検討した⁽⁶⁹⁾。

まず、オフィス照明で一般的に用いられる蛍光灯40W（直管）2灯用の照明器具一灯による鉛直面照度と等価光幕輝度が、照明器具の配光の違いによって、どのような差異があるかを測定して調べた。測定における照明器具と測定装置の配置を図5-1に示す。照明器具直下から鉛直面照度または等価光幕輝度の測定点までの距離は0～6mまでとした。照明器具には、配光が異なる例として、ランプが露出しており、水平方向からもランプが見える照明器具（照明器具A）、照明器具の水平方向への光は遮光されているが、不快グレアへの配慮をしていない照明器具（照明器具B）、照明器具の直下から60度以上の方向に放射される光を遮光して不快グレアを軽減した照明器具（照明器具C）の3種類を用いた。

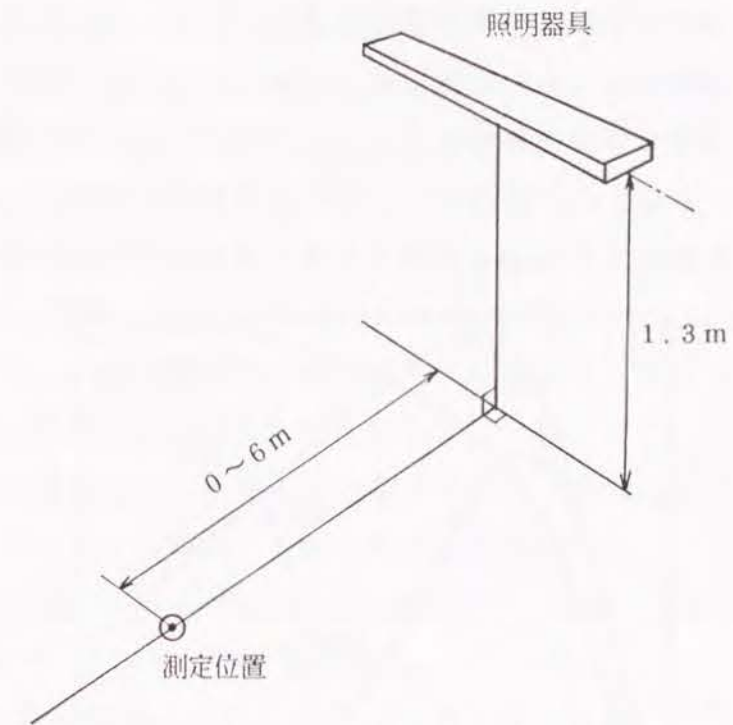


図5-1 照明器具と測定装置の位置関係

図5-2に鉛直面照度の測定結果を示す。図からいずれの照明器具の場合でも、照明器具の直下から約1mの位置で鉛直面照度が最大となり、それ以上の距離では距離が長くなるとともに、急激に鉛直面照度が低下することがわかった。

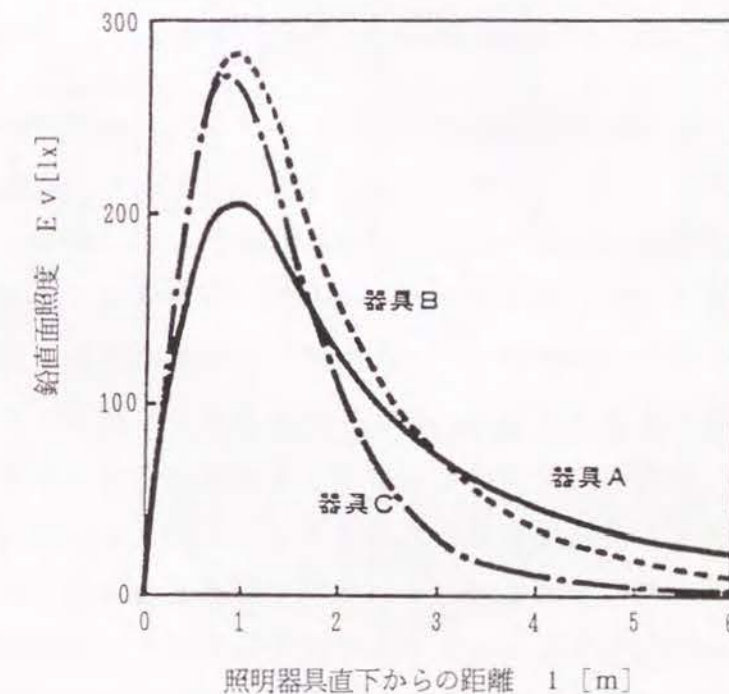


図5-2 測定位置と鉛直面照度との関係

Distance [m]	Fixture A (cd/m²)	Fixture B (cd/m²)	Fixture C (cd/m²)
0	0.0	0.0	0.0
1	0.8	1.2	1.0
2	1.2	1.4	0.8
3	1.4	1.2	0.4
4	1.5	0.9	0.2
5	1.5	0.7	0.1
6	1.4	0.5	0.05

明器具の配光によって、鉛直面照度がほぼ同等であっても、顔のブライトネスは異なることが考えられる。

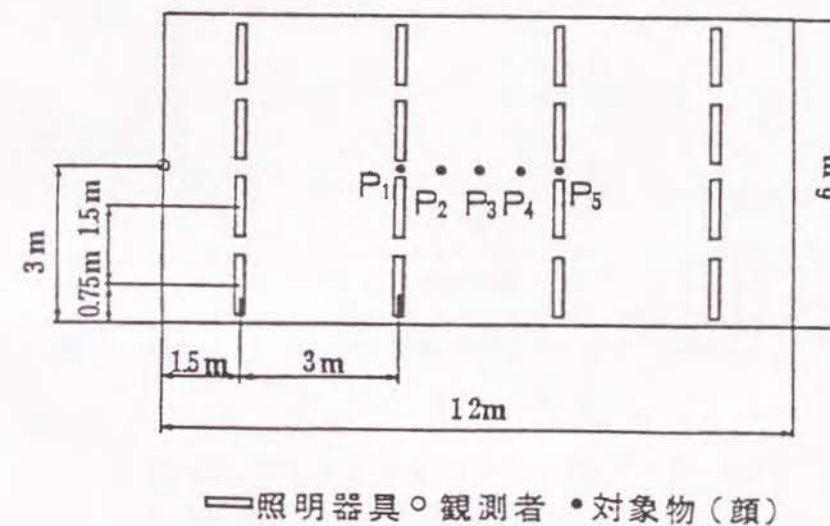
検討のための計算条件は以下の通りとした。

ランプが露出し、水平方向からもランプが見える照明器具（照明器具A）、照明器具の水平方向への光は遮光されているが、不快グレアへの配慮をしていない照明器具（照明器具B）、照明器具の直下から60度以上の方向に放射される光を遮光して不快グレアを軽減した照明器具（照明器具C）

(c)内装の反射率：天井60%、壁40%、床20%

(d) 照明器具の取付間隔: 2 m、2.4 m、3 m の 3 条件

(e)顔の位置および観測者の位置：顔および観測者の位置（奥行きが1.2 mの場合を例として）を図5-4に示す。観測者は壁面を背に、室内の中央を見ているとし、対象物となる顔は中央の照明器具の1スパンの間の5箇所を設定した。



また、ブライトネスの計算要因はそれぞれ以下のようにした。

-107-

面での鉛直面照度（観測者側）を計算し、その照度から顔面の反射率を30%として輝度を求めた。

2) 中心窩順応輝度：観測者が対象物となる顔を十分に注視していると想定し、中心窩順応輝度は対象物輝度と等しい値とした。

3) 等価光幕輝度：照明器具の配光データをもとに、各照明器具からの光による等価光幕輝度を計算した。また、配光データをもとに、天井面、各壁面、床面の輝度を計算し、それらの輝度の値をもとに、天井面、各壁面、床面による等価光幕輝度を計算した。以上の照明器具による等価光幕輝度と各面（天井面、壁面、床面）による等価光幕輝度を加算して、観測者の等価光幕輝度を求めた。

上述の計算条件に対して対象物（顔）のブライトネスを算出した。計算結果をもとに、照明器具による顔の位置と顔のブライトネスとの関係を求めた。その結果を、照明器具の取付間隔ごとに図5-5に示す。

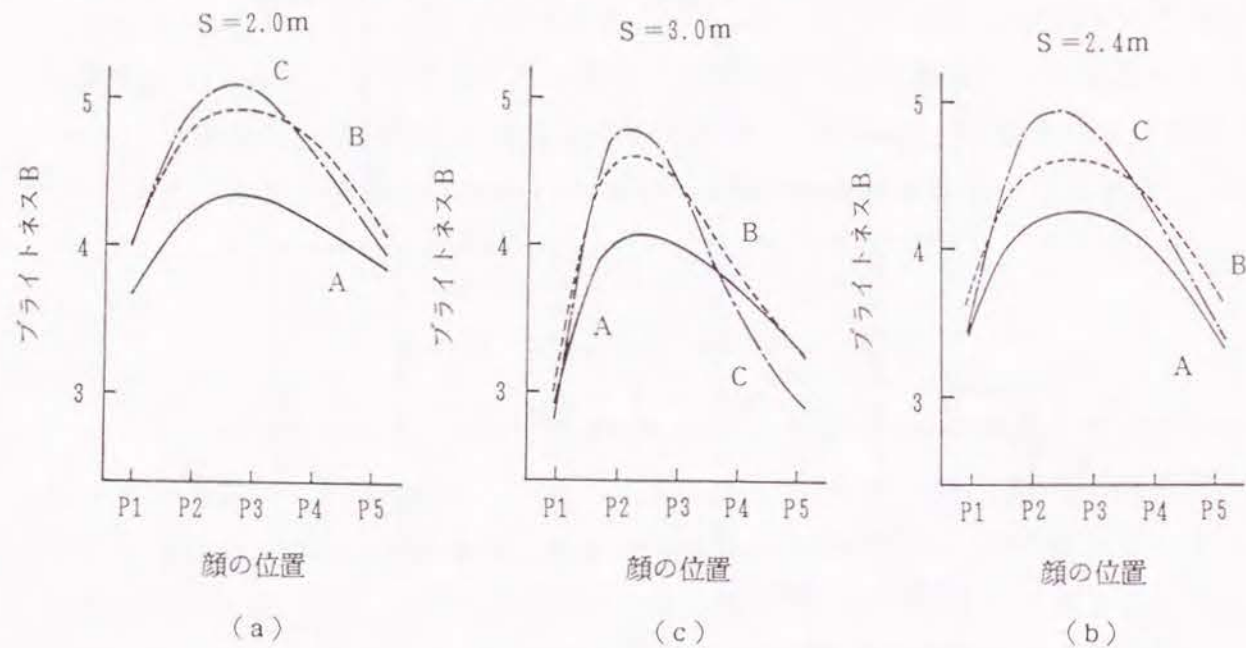


図5-5 顔の位置と顔のブライトネスとの関係
(照明器具の種類をパラメータとして)

これらの図から、照明器具Aの場合には、照明器具直下でのブライトネスの低下はやや小さいが、ほとんどの位置でブライトネスが低い。これに対して、照明器具Cの場合には、高いブライトネスを得られるが、照明器具の直下でブライトネスの低下が大きいことがわかった。また、顔の位置によるブライトネスの変動の

大きい照明器具Cについて、照明器具の取付間隔を変化させた場合の顔の位置とブライトネスとの関係を図5-6に示す。図から、照明器具の取付間隔が広がるほどブライトネスの変動が大きくなることが明らかである。これは、照明器具の取付間隔が広がると、照明器具直下での鉛直面照度が低くなることが原因である。

これらの結果から、グレアを軽減した照明器具を用いることによって、等価光幕輝度を小さくできるので、極端に鉛直面照度が低下しないように照明器具の取付間隔を配慮することによって、顔の高いブライトネスを得られることが明らかになった。このことから、グレアを制限した照明器具は、不快なグレアを軽減するだけでなく、顔を明るくみせる効果があることが明らかになった。

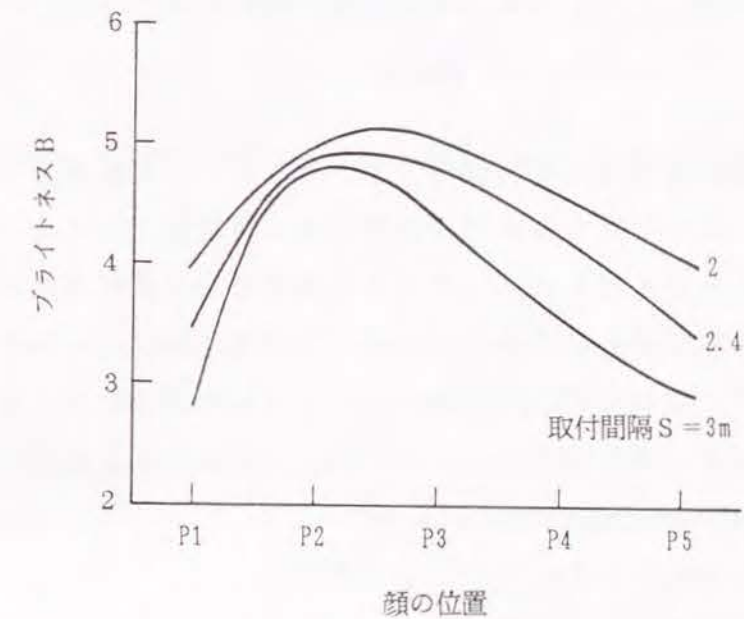


図5-6 顔の位置と顔のブライトネスとの関係
(取付間隔をパラメータとして)

5. 1. 2 シルエット現象の防止

前節のブライトネスの測定の一例として、昼間の高輝度の窓を背にした人の顔のブライトネスを測定し、顔の明るさが夜間やブラインドで窓を遮光した場合に比べて極端に低くなることを数値的に示した。このような顔が暗く見える現象は従来からオフィス照明の一つの問題とされており、これを解決するための照明要

件が検討されている。それらの研究では、それぞれ任意に選んだ形状・寸法の背景を用いて昼間の窓を透して生ずる背景輝度を再現し、その輝度を変化させたときに、顔が或明るさに見えるための顔面輝度を求めている。しかし、観測者の目の順応状態は背景の輝度だけでなく、その形状や寸法によっても変化するので、それらの結果を異なる形状や寸法の背景に対して適用できないことがある。この問題を解決する方法として、顔の必要な明るさを得るための顔のブライトネスを求める方法がある。このように照明要件をブライトネスの値で定めれば、様々な輝度、形状、寸法の背景に対しても、ブライトネスの計測理論を用いてそれぞれの条件での目の順応状態から必要な顔面輝度を求めることが可能である。そこで、顔の必要な明るさの下限として「顔がシルエットに見えない」という条件を設定し、このために必要なブライトネスの値を実験によって検討した⁽⁷¹⁾。

(1) 実験

実験では、観測者に高輝度の面光源を背景とした人の顔を観測させ、顔を照明する光源を調光して顔の輝度を連続的に調整させ、その顔がシルエットに見えないための下限を求めさせた。また、このときの顔面輝度を実験者が測定した。観測者には、観測前に高輝度の面光源を5分間注視させ、観測者の中心窩を面光源の輝度に順応させた。これらの観測と測定を一つの面光源の輝度条件に対して、各観測者ごとに3回ずつ繰り返した。また、以上の観測・測定を顔の背景となる面光源の輝度を変化させて繰り返した。

実験条件は以下のようにした。

- (a) 面光源 輝度・・・1000～5000cd/m²の4条件
形状・・・視角寸法がタテ16°、ヨコ28°の長方形
- (b) 顔面輝度 可変
- (c) 観測者 4名

(2) 実験結果

各観測者が繰り返し3回の調整を行なった結果（顔面輝度の下限値）を平均し、さらに、4名の観測者の平均値（顔面輝度）を求めた。次に顔面輝度を平均値の値としたときの顔のブライトネスを測定した。このようにして求めたブライトネ

スと背景の輝度との関係を求めた。その結果を図5-7に示す。

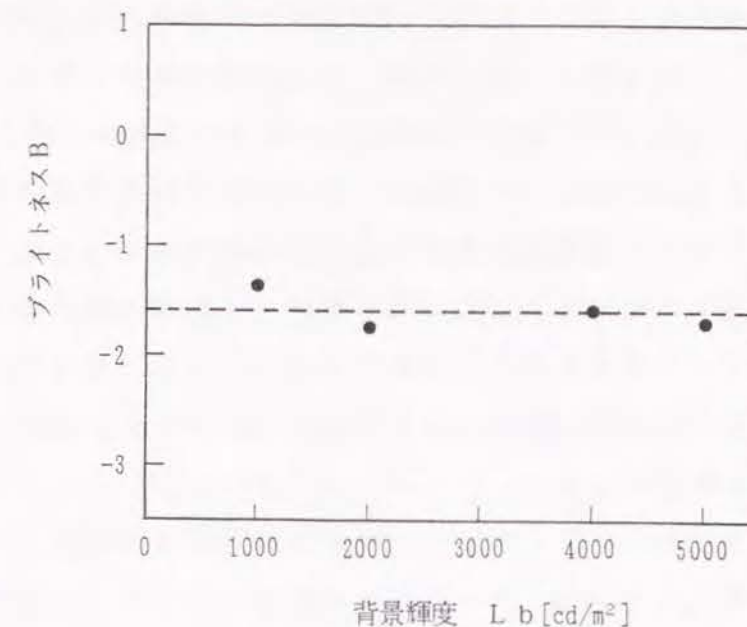


図5-7 背景輝度とシルエットを防止するための輝度との関係

図の横軸は実験で設定した背景輝度である。図から顔がシルエットに見えないために必要なブライトネスの下限は、背景輝度によらず（すなわち、目の順応状態によらず）約-1.6（一定）であることが明らかになった。このことから、昼間の窓のような高輝度面を背景にしている人の顔がシルエットに見えないためには、顔のブライトネスが-1.6以上となるような顔面照度を確保する必要があることが明らかになった。たとえば、前節に示した人の顔の場合をブライトネスの計測理論を用いて計算すると、顔がシルエットに見えないためには、顔面を約880 [lx]以上に照明する必要があることが求められる。

5. 2 道路トンネル照明

都市内の高速道路のように交通量が多く、運転者の前方視野に先行車があることが常態であるような道路トンネルでは、昼間のトンネル入口において先行車がトンネル内部に進入した直後から先行車が急激に暗く見え、先行車の詳細を視認

しにくくなる。このため、後続する自動車の運転者が、先行車が見えにくくなることにより、不安になりスピードを緩め、交通の乱れが起こり、これがトンネル入口での交通のボトルネックの一因となる。この問題を解決するためには、先行車の背面を照明して、先行車を明るく視認しやすくする必要がある。

これに関して、4. 2節で示したように、種々の照明条件下での先行車の明るさはブライトネスを用いて定量的に求めることが可能であり、また、ある値のブライトネスを確保するために必要な先行車の輝度や先行車の照度は、ブライトネスの計測理論を応用して求めることが可能である。しかし、トンネル入口付近で必要とされる先行車の視認性を確保するためには、ブライトネスでいくらの値を確保すれば良いかは明らかでない。

このため、まず先行車のブライトネスと先行車の視認性の程度との関係を観測実験によって求めることとした。次に得られた関係を用いて、必要な視認性を確保するために必要なブライトネス値を定め、そのブライトネスを得るために必要な先行車の背面での照度を解析した。

5. 2. 1 観測実験

実物大のトンネル実験施設において、トンネル内部のさまざまな位置に配置した視標（先行車を想定）のブライトネスを測定するとともに、観測者に「後続する自動車の運転者の立場で先行車を観測している」と想定させ、視標（先行車を想定）の視認性を主観評価させた。

(1) 実験条件

各実験条件は以下のように設定した。

(a) 視標：先行車に相当する大きさ（縦70[cm]×横140[cm]の長方形）、反射率（15[%]）の視標を用いた。

(b) 照明レベル：以下の3種類の照明レベルを設定した。

レベルA：レベルCに鉛直面照度を1,400[lx]程度付加

レベルB：レベルCに鉛直面照度を700[lx]程度付加

レベルC：現行の設計速度80km/hのトンネル入口照明（対称照明）による鉛直面照度（約800[lx]）

レベルCを実現する照明は常に全点灯しておき、増灯照明の点灯条件を変化させることにより、レベルA（増灯照明全点灯）、レベルB（増灯照明を1灯おきに点灯）、レベルC（増灯照明消灯）の各照明レベルを設定した。

(c) トンネル外部の輝度条件：野外輝度で約3,000～約5,000[cd/m²]

ここで野外輝度とはトンネル坑口の手前約150mの距離からトンネル坑口の中央を見たときの直径20度の円形視野の平均輝度を示し、この輝度が現在のトンネル入口照明の基準において、トンネル入口に接近する自動車の運転者の目の順応状態を代表するものとされている。

(d) 観測距離（測定位置～視標の距離）：30, 50, 100[m]

(e) 測定区間：トンネル坑口手前100[m]～トンネル内120[m]

(f) 観測者：13名

実験は各照明レベル（A、B、C）について、測定日を変えて各2回ずつ計6回実施した。

(2) 実験方法

トンネルの内外に、図5-8に示すように、先行車相当の視標、ブライトネス測定のための計測機器、観測者を配置し、図に示す範囲内で観測者と視標との位置を変化させてブライトネスの測定と視認性の評価を行なった。

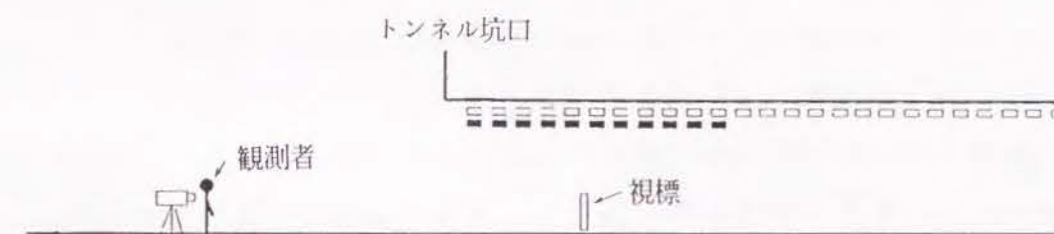


図5-8 実験装置、観測者の配置の概要

ブライトネスの測定は、その計測理論に基づき、その要素である対象物輝度、等価光幕輝度、中心窩順応輝度を以下の方法でそれぞれ測定し、それらの測定からブライトネスを算出した。

1) 対象物輝度（ L_o ）：視対象物である視標の輝度 L_o は、視標位置での鉛直

面照度 E_v を測定し、 E_v と視標の反射率 ρ とから、次式により求めた。視標の反射率 ρ は、実測値 ($\rho = 0.15$) を用いた。

$$L_o = E_v \cdot \rho / \pi \quad (5-1)$$

視標位置での鉛直面照度には、観測評価時に測定した視標の中央部(地上高さ 70[cm])の照度を用いた。視標位置での鉛直面照度は視標の左右の中央線上、地上から 30、70、100[cm] の 3 箇所で測定したが、3 箇所の測定値のばらつきが小さかったので、視標の中心、地上 70[cm] の位置での測定値で代表させることとした。

2) 中心窩順応輝度 (L_{af}) : 観測者は、視対象物である視標を注視し、これに順応していると考えられるため、対象物輝度を中心窩順応輝度とした。

3) 等価光幕輝度 (L_{eq}) : 観測位置での等価光幕輝度を観測評価時に測定した。測定は、等価光幕輝度計(輝度計にグレアレンズよりを装着した装置)により、光軸を地上高さ 1.2[m]、進行方向に水平に調整して実施した。

視認性の主観評価は、観測者に「自分が後続する自動車の運転者である」と想定させ、先行車に相当する視標の視認性の程度を、表 5-1 に示すように「非常によい」から「非常に悪い」までの 7 段階の評価尺度にしたがって評価させた。この方法による評価結果を、以下では「主観評価値」と呼ぶ。

表 5-1 視認性の評価尺度

評価値	評価カテゴリー
7	非常によい
6	かなりよい
5	ややよい
4	よくも悪くもない
3	やや悪い
2	かなり悪い
1	非常に悪い

今回の視認性の主観評価に際して、観測者に対して与えたインストラクションは次の通りである。

(観測者に対するインストラクション)

これから観測実験を始めます。この実験では、前方に配置された、先行車を想定した対象物の見え方について評価して頂きます。

このとき、観測者の方は後続する車のドライバーであり、トンネル内にある先行車を見ながら運転していると仮定して下さい。評価は記録用紙の右側に示してある通り、非常によい、かなりよい、ややよい、よくも悪くもない、やや悪い、かなり悪い、非常に悪い、の 7 段階評価です。先行車を見た時の見え方について 7 段階のいずれかに丸印をつけてチェックして下さい。

評価を行なっているときに気付かれたことがありましたら、評価用紙の余白や裏にその時の条件と気付かれたことを自由にお書き下さい。

(3) 実験結果

ブライトネスの測定結果と視認性の主観評価結果とを、照明レベルごとに以下の表に示す。

表 5-2 に照明レベル A の条件の結果を、表 5-3 に照明レベル B の条件の結果を、表 5-4 に照明レベル C の条件の結果を示す。各表において、第 1 列目は視標と観測者との距離、第 2 列目はトンネルの入口から視標までの距離である。また、第 3 列目と第 4 列目はそれぞれ第 1 回目の実験でのブライトネスの測定値と観測者の主観評価値の平均値を、第 5 列目と第 6 列目はそれぞれ第 2 回目の実験でのブライトネスの測定値と観測者の主観評価値の平均値を示す。

表5-2 先行車のブライトネスと視認性の評価結果
(照明レベル: Aの場合)

観測距離 [m]	視標位置 [m]	第1回目 (A-1)		第2回目 (A-2)	
		ブライトネス (測定)	視認性 (観測評価)	ブライトネス (測定)	視認性 (観測評価)
30	0	19.3	7.0	18.7	6.9
	10	2.4	5.1	2.3	5.2
	15	2.1	5.1	2.0	5.4
	20	2.6	5.3	2.6	5.4
	30	4.2	5.2	4.5	5.3
	40	5.6	5.9	5.8	5.8
	50	5.0	5.3	5.0	5.2
50	0	18.4	6.9	18.4	6.9
	10	1.1	4.6	1.1	4.9
	20	0.6	5.1	0.6	4.8
	25	1.0	4.6	0.8	4.9
	30	1.2	4.8	0.9	4.8
	40	1.9	4.8	2.3	4.8
	50	3.4	4.5	3.3	4.6
	60	4.8	4.7	5.0	5.1
	70	4.8	4.8	4.8	5.1
100	0	19.2	6.6	18.8	6.9
	10	-0.4	4.3	-0.7	4.4
	20	-1.6	3.6	-1.6	3.8
	30	-1.9	3.8	-1.8	4.0
	40	-1.7	4.1	-1.4	4.1
	50	-2.0	3.9	-2.1	4.0
	60	-1.7	3.7	-1.6	3.8
	70	-1.1	3.8	-1.1	3.9
	80	-1.6	2.4	-1.7	2.7
	100	0.8	2.2	1.1	2.8
	120	1.8	1.9	2.1	2.7

表5-3 先行車のブライトネスと視認性の評価結果
(照明レベル: Bの場合)

観測距離 [m]	視標位置 [m]	第1回目 (B-1)		第2回目 (B-2)	
		ブライトネス (測定)	視認性 (観測評価)	ブライトネス (測定)	視認性 (観測評価)
30	0	20.7	7.0	19.8	7.0
	10	5.8	5.8	6.5	5.4
	15	1.8	4.9	3.1	4.9
	20	1.4	4.8	2.3	4.9
	30	1.2	4.6	1.2	4.7
	40	5.1	4.8	5.2	5.2
	50	4.6	4.9	4.7	5.2
50	0	20.7	6.9	19.7	6.9
	10	4.6	5.5	5.5	5.4
	20	-0.2	4.9	0.7	4.4
	25	-0.5	4.2	0.2	4.3
	30	-0.5	4.3	0.0	4.1
	40	-0.3	4.1	0.2	3.7
	50	0.2	3.6	-0.1	3.8
	60	4.3	4.1	4.1	4.4
	70	3.9	4.2	4.0	4.5
100	0	20.6	6.8	19.6	6.8
	10	3.7	5.3	4.3	4.7
	20	-1.7	3.6	-1.1	3.2
	30	-2.5	3.0	-2.3	2.7
	40	-2.8	3.3	-2.6	2.9
	50	-3.3	3.1	-3.1	2.8
	60	-3.0	2.6	-3.1	2.7
	70	-3.1	2.5	-2.6	2.7
	80	-3.3	2.3	-3.0	2.2
	100	-1.7	2.3	-2.2	1.9
	120	2.0	2.6	1.9	2.7

表5-4 先行車のブライトネスと視認性の評価結果
(照明レベル：Cの場合)

観測距離 [m]	視標位置 [m]	第1回目 (C-1)		第2回目 (C-2)	
		ブライトネス (測定)	視認性 (観測評価)	ブライトネス (測定)	視認性 (観測評価)
30	0	15.8	6.8	20.7	7.0
	10	2.3	4.6	3.5	5.2
	15	2.0	4.4	1.7	4.7
	20	2.1	4.4	1.0	4.7
	30	3.6	4.3	0.9	4.2
	40	3.7	4.8	4.2	4.8
	50	3.8	4.5	4.1	4.7
50	0	15.5	6.5	20.2	6.9
	10	1.0	4.0	2.3	5.0
	20	0.2	3.8	-0.9	4.4
	25	0.4	3.3	-1.1	3.3
	30	0.6	3.6	-1.3	3.4
	40	1.2	3.4	-1.0	3.2
	50	3.6	3.6	0.3	3.2
	60	3.3	4.0	3.3	3.8
	70	3.0	3.7	3.2	3.6
100	0	16.5	6.4	20.6	6.9
	10	-1.0	3.1	0.7	4.7
	20	-2.5	2.8	-3.2	2.6
	30	-2.5	2.6	-4.0	2.4
	40	-2.2	2.6	-4.6	2.1
	50	-1.7	2.4	-4.7	2.0
	60	-2.0	2.5	-4.5	1.5
	70	-1.6	2.3	-4.0	1.4
	80	-0.5	2.5	-3.2	1.7
	100	2.5	2.9	-1.2	1.8
	120	2.2	2.8	1.8	2.5

以上のブライトネスの測定結果と視認性の評価結果をもとに、ブライトネスと視認性の主観評価値との関係を求めた。その結果を図5-9に示す。

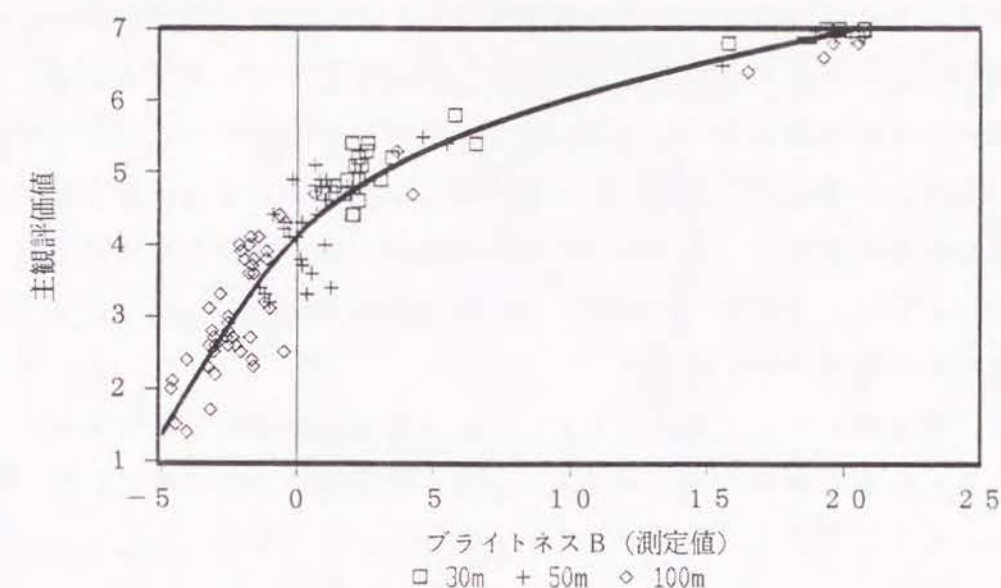


図5-9 ブライトネスと視認性の主観評価値との関係

この図から、観測者の様々な目の順応状態、様々な視標の輝度条件や観測距離にもかかわらず、ブライトネスと主観評価値との間には一定の相関関係が成立することが明らかになった。この結果から、先行車の視認性という、比較的に高次の判断が要求される評価でも、ブライトネスと視認性との間には一定の関係があり、ブライトネスの値から視認性の程度を求められることが明らかになった⁽⁷²⁾。

5. 2. 2 先行車の視認性を確保するための照明要件の解析

先行車の視認性を確保するトンネル入口付近の照明を設計するためには、先行車をどの程度照明するか、という照明要件を設定する必要がある。

上述の観測実験の結果から、ブライトネスと視標（先行車）の視認性とが一定の関係にあり、ブライトネスをもとに先行車の視認性の主観評価値を求めることが可能であることが明らかになった。ここで、先行車の視認性を確保するための先行車の背面での鉛直面照度の所要条件を明らかにするため、先行車の視認性が、「ある評価値以上」の値となるために必要な鉛直面照度を算出した⁽⁷³⁾⁽⁷⁴⁾。この場合、まず必要な評価値の下限を定めなければならない。

今回の観測実験では、視認性の評価尺度として「非常に悪い」から「非常に良い」までの7段階の尺度を用いた。各観測者の結果をみると、ほとんどの観測者が先行車がトンネル野外にあるときの視認性を7、すなわち「非常に良い」の評価をしており、これをひとつの判断基準として評価していると考えられる。このため、「良い」という評価は、先行車がかなり見やすい条件に対して与えられていると考えられる。すなわち評価が全体的に厳しい評価値となった可能性がある。また、今回の照明の目的は、先行車の視認性が悪いという問題を解決することにある、必ずしも「良い」という評価まで確保する必要はなく、少なくとも「悪い」という評価でなければよいと考える。

以上から、評価値4「よくも悪くもない」を必要な評価値の下限とした。

次に、図5-9に示すブライトネスと視認性の評価値との関係を用いて、視認性を評価値が4となるためのブライトネスを求めた。その結果、先行車のブライトネスを0.0以上とすれば、必要な視認性を確保できることが明らかになり、このための鉛直面照度を算出した。

以下にブライトネスが0.0となるための鉛直面照度、すなわち、必要な視認性を確保するための鉛直面照度を算出する条件を示す。

(a)野外輝度: 2700[cd/m²] (設計野外輝度4000[cd/m²])

(b)車間距離: 30m、50m、80m、100m、110m

(110mは、設計速度80km/hの視距に相当)

(c)照明区間: トンネル坑口から車間距離に相当する区間

以上の条件に対して、まずブライトネスを計算要素である等価光幕輝度と中心窩順応輝度の値を観測実験での測定値から求めた。この場合、実際に自動車で行っている条件では、観測実験の場合と異なり、トンネル入口に進入した運転者の中心窩順応輝度は、トンネル外部の注視していた輝度（これはトンネルに接近する運転者の注視点分布の測定結果からトンネル外部の路面輝度ではほぼ代表できると等しいと考えられるので、観測実験のときのトンネル外部の路面輝度の値を中心窩順応輝度とした。次に、これらの輝度値をもとに、ブライトネスの定量化式を用いて、ブライトネスが0.0となるための先行車（の背面）の輝度を求めた。次に、先行車の背面の反射率を20%として、前述の輝度を確保するための照度（鉛直面照度）を算出した。解析結果を表5-5、図5-10に示す。

表5-5 トンネル入口付近の所要鉛直面照度
(野外輝度: 2700 cd/m²の場合)

観測距離 [m]	視標位置 [m]	鉛直面照度 [lux]		
		所要照度	現行照明	増灯照明
30	0	1500	539	0
	10	1260	539	0
	20	995	539	0
	30	585	539	0
50	0	1770	539	0
	10	1700	539	0
	20	1500	539	0
	30	1260	539	409
	40	995	539	304
	50	585	508	0
80	0	2280	539	0
	10	2100	539	0
	20	1900	539	639
	30	1770	539	919
	40	1700	539	1010
	50	1500	508	852
	60	1260	480	722
	70	995	452	519
	80	585	426	130
100	0	2060	539	0
	10	2280	539	0
	20	2100	539	1020
	30	1900	539	1250
	40	1770	539	1210
	50	1700	508	1120
	60	1500	480	1160
	70	1260	452	1020
	80	995	426	805
	100	585	378	180
110	0	2060	539	0
	10	2060	539	0
	20	2280	539	1020
	30	2100	539	1430
	40	1900	539	1410
	50	1770	508	1250
	60	1700	480	1230
	70	1500	452	1210
	80	1260	426	1050
	100	995	378	590
	110	585	357	201

表5-5の鉛直面照度の欄の「所要照度」は、自然光によるトンネル内部への入射光をゼロとした場合の、人工照明のみで主観評価値4を得るために必要な鉛直面照度であり、「増灯照明」は「所要照度」から自然光の入射、現行の入口照明で確保される鉛直面照度を差し引いた鉛直面照度（主観評価値4を得るために増灯照明により付加する必要のある鉛直面照度）である。

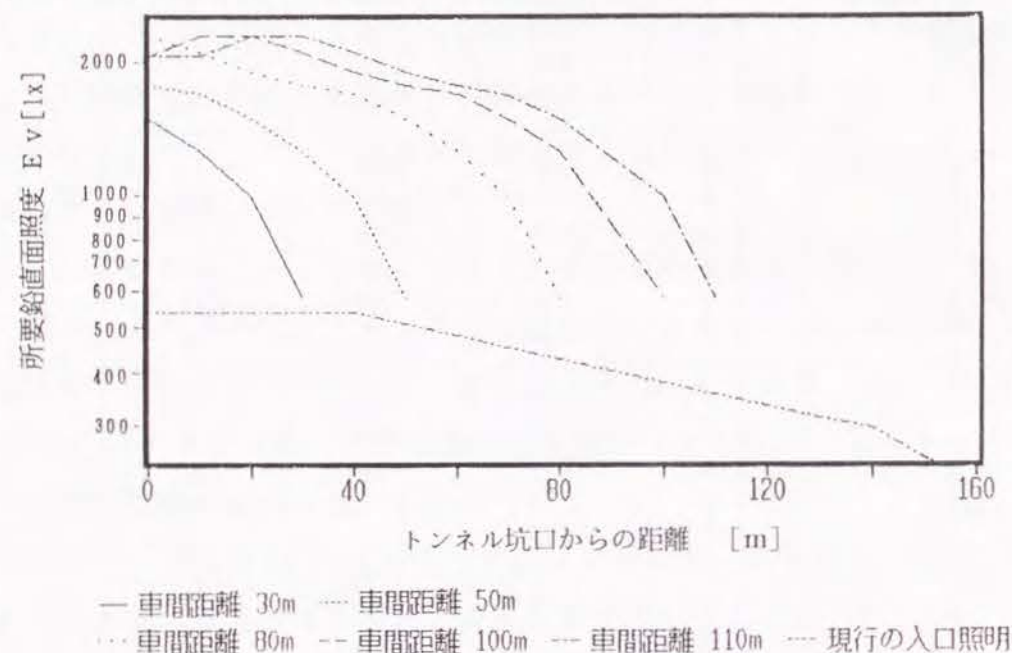


図5-10 先行車の視認性を確保するために必要な鉛直面照度

図5-10の横軸はトンネル坑口からの距離、縦軸は所要鉛直面照度（自然光によるトンネル内部への入射光をゼロとした場合）である。図中の一点鎖線は、現行の設計速度80km/h、設計野外輝度4000[cd/m²]の照明を設備したときの鉛直面照度の値を示す。図から車間距離がいずれの場合も、トンネル坑口から車間距離とほぼ同等の距離までの範囲は現行より高い鉛直面照度が必要であり、特に入口付近では高い鉛直面照度が必要であることが明らかになった。また、車間距離が100m、110mの条件に対する所要鉛直面照度は、50mの条件でのそれに比べて高く、100m、110mに対する要件を満足すれば、それより短い車間距離での先行車の視認性が確保できることが明らかである。

ただし、実際のトンネルでは、トンネル坑口の方角と太陽位置の関係によって異なるが、トンネル入口の付近では自然光（太陽直射光と拡散光）がトンネル内部に入射する。この入射光によって鉛直面照度を確保することが可能である。

そこで、今回の実験に用いたトンネルでの自然光の入射光の測定結果をもとに、野外輝度が2700[cd/m²]の条件に対して、トンネル入口からの距離と入射光による鉛直面照度を算出し、図5-10に示す所要鉛直面照度から自然光による鉛直面照度を差し引いて、人工照明によって実現すべき鉛直面照度を求めた。その結果を図5-11に示す。

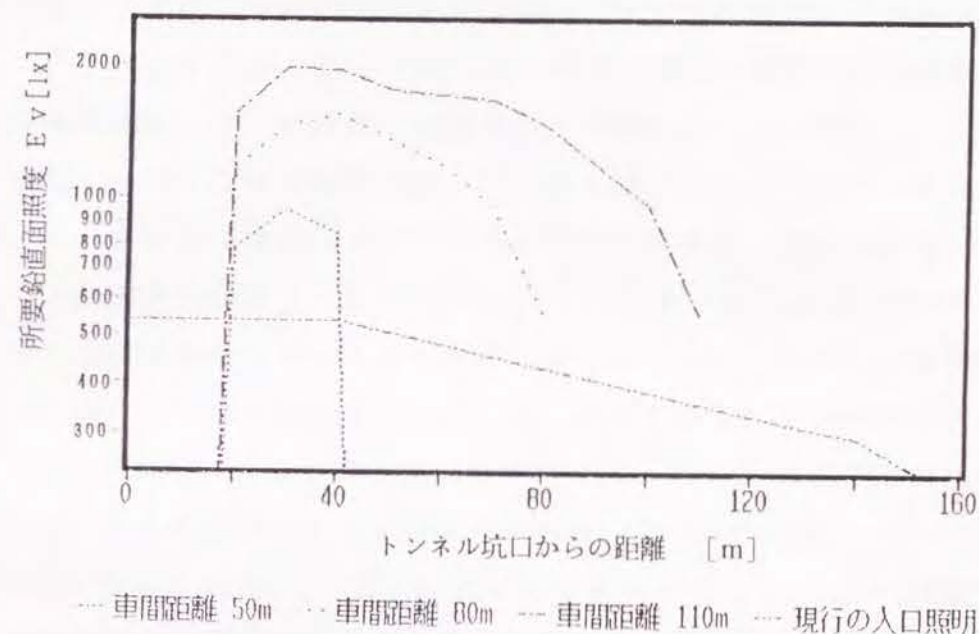


図5-11 人工照明の所要鉛直面照度

図から、トンネル入口から20m以内では、自然光による鉛直面照度が高いため、人工照明によって与える必要がある鉛直面照度はやや低いといえる。ただし、自然光による鉛直面照度は、前述のように、トンネル坑口の方角や太陽位置によって種々変化する。今回、自然光によるトンネル内部への入射光を実測したトンネル坑口はほぼ真南に向いており、自然光によって高い鉛直面照度を得やすい条件であったといえる。したがって、実際に人工照明として確保すべき鉛直面照度はトンネル坑口の方角などを検討して設定することが必要である。

5. 3 その他

5. 3. 1 店舗の局所照明の効果

店舗照明では、商品の内容によって、照明方法を変化させ、その商品に合った照明環境を設定している。たとえば、食品や日用雑貨の売り場では、全般照明によって全体として高い照度に照明し、特定の商品だけを明るくみせるのではなく、売り場全体を明るく感じられるようにしている。これに対して高級衣料品や装飾品の売り場では、特定の商品を集散的に照明し、周囲との明るさの差別化を行ない、商品を引き立たせて見せている。このような局所照明については、従来は経験豊富な店舗照明の専門家の知識や経験に基づいて設計されてきた。

局所照明の一つのポイントは、集散的に照明する商品の「明るさ」を適切に設定することが考えられる。この「明るさ」を一般の照明設計者が容易に設定できるようにする方法として、ブライトネスを応用する方法が考えられる。すなわち、経験豊富な専門家が設定した「明るさ」をブライトネスを用いて定量化し、それを局所照明の要件とする。これによって、そのブライトネスの値を実現することにより、適切な局所照明が実現できる。そこで、大型店舗において、商品のブライトネスを測定した。

(1) 測定方法

測定場所には局所照明による効果が重要となる高級婦人服売り場を選んだ。

測定対象としては、壁面に展示されている婦人服と、同じ位置に配置した反射率30%の灰色色票を選んだ。対象物のブライトネスの要因である対象物輝度が対象物の反射率によって変化し、この反射率は商品によって異なる。このため、同じ局所照明であっても商品の反射率が異なると、対象物のブライトネスが異なる。したがって、ブライトネスを用いて局所照明の要件を設定するためには、対象物の反射率ごとに要件を決めなければならず、これでは実用的ではない。この問題を解決する方法として、反射率が一定の対象物を選び、そのブライトネスの値を局所照明の要件とする方法がある。そこで、今回の測定では、反射率が30%の灰色色票を対象物として選び、そのブライトネスと対象物輝度を測定した。

また、全般照明による照明を主体としている売り場の例として、スポーツ用品売り場で同じ反射率の灰色色票のブライトネスと対象物輝度を測定した。

(2) 結果

表5-6に結果を示す。

表5-6 店舗照明でのブライトネス

照明方式	対象物	輝度[cd/m ²]	ブライトネス
局所照明	婦人服	124	7.0
	色票	72	5.5
全般照明	色票	67	4.3

表より、局所照明によって婦人服は高いブライトネスが得られていること、また、反射率30%の色票のブライトネスが約5.5となることがわかった。これより、色票のブライトネスが5.5となるように照明することによって局所照明で必要とされる対象物の明るさがほぼ実現できると考えられる。また、局所照明と全般照明では色票の輝度はほぼ近い値であるが、ブライトネスは局所照明の方が高い値となることが確認できた。これは、全般照明では、商品の周囲の輝度が比較的高いために順応状態が高くなるのに比べて、局所照明では、商品の周囲の輝度が低いために商品を低い輝度に順応した条件で見ることになるためである。

なお、今回の検討では、対象物のブライトネスのみを検討したが、局所照明の効果を発揮させるためには、対象物の明るさだけでなく、対象物とその周囲の明るさの配分も重要である。今後、対象物だけでなく、その周囲のブライトネスを測定し、商品を含む全体の明るさのバランスを検討する必要がある。

5. 3. 2 屋外ディスプレイの輝度要件

近年、各種のディスプレイが屋内外を問わず使用されている。特に、野球場やサッカー場、競馬場などでは、超大型のディスプレイが屋外で使用されている。これらの屋外ディスプレイは、屋外の明るい環境に目が順応している観客や競技者が表示内容を明確に視認できるように、高い輝度の画面を実現することが要求されている。このため、これらのディスプレイの開発では、画面輝度を如何に高めるかが開発の目標となり、メーカー間で画面輝度を高めることが競争となっていた。その結果として、高輝度の画面が得られるようになってきた。しかし、画面の明るさは観測者の目の順応状態によって変化するので、ディスプレイの背景となる視野の大部分が暗い建物や山などの自然物があったり、暗い曇の日や夕刻など、観測者の目の順応状態が比較的暗い視野に順応しているときには、明る過ぎて電力エネルギーの浪費となることが考えられる。

そこで、一般家庭でテレビを見ているときの画面の明るさを適切かつ標準的な明るさと想定し、屋外において種々の順応状態のときに、家庭内でのテレビ画面のブライトネスと等しいブライトネスを得られるための屋外ディスプレイの画面輝度を検討した。

(1) 検討方法と結果

まず、明るさの基準とするテレビ画面のブライトネスを算出した。この場合、テレビ画面（全面が白色表示）の輝度を 300cd/m^2 、それを観測する人の順応状態を輝度が 100cd/m^2 の均一視野に順応しているときと等しいとした。これらの条件に対してブライトネスを算出した結果、テレビ画面はブライトネスで1.0となった。

次に、屋外での目の順応状態がそれと等価な順応状態を生ずる均一視野の輝度で $1000\sim 6000\text{cd/m}^2$ の範囲で変化すると考え、それぞれの順応状態において、ディスプレイの画面のブライトネスが1.0となるための画面輝度を算出した。その結果を図5-12に示す。

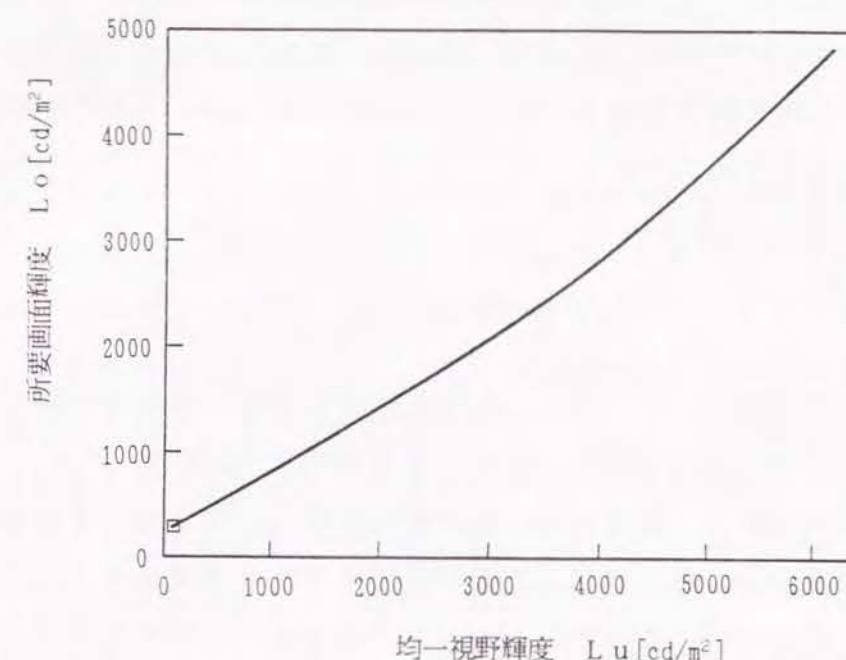


図5-12 均一視野輝度と所要画面輝度との関係

図から必要なブライトネスを確保するための画面輝度は、観測者の順応状態が高いほど、高い輝度となることが確認できた。また、必要なブライトネスを得る方法として、画面輝度を高めるだけでなく、観測者の順応状態を低く抑える、たとえば、ディスプレイの周囲に輝度の低い背面板を設置する、また、ディスプレイの取付方位を工夫して観測者からみたディスプレイの背景に輝度の低い事物が入るようにする方法が考えられる。このような方法を用いると、ディスプレイの輝度が低くても明るい画面を得ることが可能である。

また、屋外の視環境では観測者の視野内の輝度が天候や、時刻によって変化し、これによってディスプレイを見ている人の順応状態も変化する。そこで、屋外ディスプレイを観測するときの観測者の代表的な観測位置と観測方向を選択し、その位置・方向に順応状態を測定するセンサを設置し、その出力によってディスプレイの画面輝度を制御する方法が考えられる。この方法を用いることにより、ディスプレイを観測するときの視環境の変化に応じて適切な画面輝度を精度良く設定でき、ディスプレイの適切な視認性を確保するとともに、エネルギーの浪費を防止することが可能である。

以上、本章では、ブライトネスとその計測理論の応用について、筆者が実施した主な事例を実施した述べた。その他、本研究の成果によるブライトネスは、美術館や博物館での展示物の照明や、スポーツ施設でのグラウンドの照明にも応用されていることを付記する。

[参考文献]

- (69)猪野原誠、武内徹二、角 清二：鉛直面照度と等価光幕輝度が顔の明るさに及ぼす影響、昭和55年度照明学会全国大会講演論文集、(1980) 83-84
- (70)角 清二、武内徹二、猪野原誠：屋内照明器具による等価光幕輝度が視感輝度（明るさ）に及ぼす影響、昭和56年照明学会全国大会講演論文集、(1981) 87
- (71)猪野原誠、武内徹二：人の顔のシルエット現象を防止するための照明条件、昭和55年度電気関係学会関西支部連合大会講演論文集、(1980) G338
- (72)武内徹二、清水正則、宮川勝海、小林浩之：トンネル入口部での先行車の視認性（その1）－ブライトネスと視認性－、平成7年度照明学会全国大会講演論文集、(1995) 144
- (73)山中泰彦、坂本正悦、宮川勝海、小林浩之：トンネル入口部での先行車の視認性（その2）－視認性の改善に関する検討－、平成7年度照明学会全国大会講演論文集、(1995) 145
- (74)坂本正悦、山中泰彦、浅見真一、武田裕之：プロビーム照明の開発、平成7年度照明学会東京支部大会講演論文集、(1995) 36

第6章 結論

人間が感じる”明るさ”を正確に計測したり、予測することは照明環境の評価や照明機器の性能評価など、照明技術のもっとも重要な技術の一つである。

このため、従来から明るさ感覚に関する視覚特性の研究や、それを基にした明るさの定量化の研究が進められてきた。この一つが目の順応特性を考慮して明るさの感覚を定量化するブライトネスの研究である。しかし、その研究結果は実際の照明技術には活用されていない。本研究の目的は、従来のブライトネスの研究を照明分野に応用するときの課題を明らかにし、それらの課題を解決して実用的なブライトネスの計測技術を確立することである。

このため、第1章では、従来のブライトネスの研究結果を実用する場合の課題を分析した。その結果、第一の課題は実際の視環境のように複雑な輝度分布の視野に対する目の順応状態を正確に求める方法がなかったこと、第二の課題は従来の研究で示されたブライトネスの尺度が実用的でなく、活用しにくいことを明らかにした。

第2章では、第一の課題を解決するため、目の順応状態に対応する視覚閾値として輝度差弁別閾を選び、輝度差弁別閾に影響する視野の輝度要因を抽出した。その結果、主要因である網膜の中心窩が順応している輝度と輝度差弁別閾との関係、および周辺視野の輝度分布と輝度差弁別閾との関係を明らかにした。さらにこの二つの要因が輝度差弁別閾に及ぼす影響の相互関係を検討し、任意の輝度分布の視野に順応しているときの輝度差弁別閾を客観的に求める方法を明らかにした。これによって任意の視野に対する目の順応状態を正確に求める方法が確立された。

第3章では、まず第二の課題を解決するため、実用的なブライトネスの尺度の要件を分析し、それらの要件を満足するブライトネスの尺度として、尺度の視野条件が容易に再現でき、ブライトネスの値が示す明るさの程度を容易に観測して確認できる尺度を明らかにした。次に、この尺度と前述の輝度差弁別閾を求める方法をもとに、任意の視野における対象物のブライトネスを、対象物輝度と輝度

差弁別閾とから求めるブライトネスの定量化式を明らかにした。また、今回のブライトネスの定量化式と従来の研究とを比較し、その妥当性を検証した。

第4章では、前章までに明らかにしたブライトネスの定量化方法をもとに、対象物輝度や中心窩順応輝度、等価光幕輝度の具体的な測定方法を検討し、ブライトネスの計測理論を確立した。また、今後の高齢者に対する照明の検討に向けて、加齢による視覚特性の変化によって対象物輝度と輝度差弁別閾とがどのように変化するかを分析し、高齢者に対するブライトネスの計測理論を考察した。さらに、計測理論に基づいてブライトネスの計測装置を試作し、それを用いてオフィスや店舗、道路トンネルなど、実際の様々な視環境において対象物のブライトネスを測定し、実際に感じる明るさの程度とブライトネスの測定値が対応することを検証した。

第5章では、今回のブライトネスの計測理論と計測技術を応用することによる効果を検討し、さらにブライトネスをもとに、2, 3の屋内照明や屋外照明に関して照明設計のための照明要件を検討した。

まず、オフィス照明については、照明器具の配光によって、在室者の顔のブライトネスがどのように変化するかを検討した。その結果、顔を明るく見え易くするためには、単に顔面の照度を高めるのではなく、顔を見る人間の目の等価光幕輝度を低減する配光が効果的であることを明らかにした。また、昼間の高輝度の窓を背景に座っている人の顔面がシルエットに見えないために必要な顔面の照明要件を明らかにした。

道路トンネル照明については、交通量の多い道路での交通渋滞や追突事故の軽減を目的に、昼間、トンネルに接近し進入していく先行車を後続する自動車の運転者から見たときに、先行車がトンネルに進入した直後から極端に暗く見えにくくなる現象を防止するための照明要件を検討した。具体的には、先行車のブライトネスと先行車の見えやすさとの関係を解析し、これをもとに一定以上の先行車の見えやすさを確保するための先行車の背面の鉛直面照度を明らかにした。

また、店舗照明については、局所照明の効果を高めるために必要な対象物のブライトネスを明らかにした。また、近年、増加している様々なディスプレイの一つとして屋外で使われるディスプレイについて、その画面が一定の明るさをえるための画面輝度を明らかにした。

以上のように、本研究により、実際の視環境での対象物のブライトネスを測定したり、また、ある照明環境で必要な明るさを確保するための輝度や照度などの要件を求めることが可能となった。本研究では、このブライトネスの計測技術を応用する効果の一例を示したが、目の順応状態によって対象物の明るさが強く影響を受ける現象は様々みられる。今後、今回示した例を含め、それらにブライトネスを応用することによって、より適切な視環境が、より高いエネルギー効率で実現されることを期待する。

また、人間の明るさの感覚は、第1章で述べたように、様々な要因によって影響を受ける。ブライトネスはこれらのうち、目の順応状態に注目し、その影響を考慮して明るさを定量化したものである。このため、ブライトネスでは考慮されていない要因によって明るさが強く影響される現象に対しては、ブライトネスでは明るさを正確に求められない場合も生ずる。今後、他の要因に関する研究成果をこのブライトネスの計測技術に組み入れ、より広範囲の明るさを正確に求められる技術に改善されることを期待する。

[発表論文]

1. 本論文に関係した投稿論文

- (1)武内徹二、成定康平：中心窩順応輝度と光幕輝度とに対する輝度差弁別閾の加法性。照明学会誌（投稿中）
- (2)吉村義典、武内徹二、成定康平：中心視での輝度差弁別いきに及ぼす周辺視野の輝度の影響。照明学会誌 Vol.62（1978）220-226
- (3)吉村義典、武内徹二、猪野原 誠：中心視での輝度差弁別閾に関する Holladayの原理の検討。照明学会誌 Vol.61（1977）713-720
- (4)Inohara M., Narisada K., Takeuchi T., Yoshimura Y.: Scaling of brightness of an object seen in complex luminance fields. Proc. of CIE 20th Session. (1983) E33
- (5)Takeuchi T., Miyamae A., Narisada K.: Brightness, adaptation and its scales. Proc. of CIE 22nd Session (1991) 93-96
- (6)Takeuchi T.: The brightness of objects in non-uniform luminance fields. Proc. of CIE 23rd Session Vol.1 (1995) 28-31

2. 本論文に関係した口頭発表

- (1)武内徹二、吉村義典、猪野原 誠：周辺視野の中心視への影響(3)（等価光幕輝度の物理的測定）。昭和51年度照明学会全国大会予稿集（1976）46
- (2)猪野原 誠、武内徹二、角 清二：鉛直面照度と等価光幕輝度が顔の明るさに及ぼす影響。昭和55年度照明学会全国大会講演論文集、（1980）83-84
- (3)猪野原 誠、武内徹二、吉村義典：明るさ（視感輝度）の計測
テレビジョン学会技術報告 VV140-3, (1980) p.69
- (4)猪野原 誠、武内徹二：人の顔のシルエット現象を防止するための照明条件、昭和55年度電気関係学会関西支部連合大会講演論文集、（1980）G338
- (5)角 清二、武内徹二、猪野原 誠：屋内照明器具による等価光幕輝度が視感輝度（明るさ）に及ぼす影響。昭和56年照明学会全国大会講演論文集、（1981）87
- (6)武内徹二、橋本健次郎、猪野原 誠：明るさ（視感輝度）の尺度に関する一検討。昭和57年度照明学会全国大会講演論文集（1982）71-72

(7)武内徹二、宇野智恵子、猪野原 誠：中心窩順応輝度による輝度差弁別いき成分と等価光幕輝度による輝度差弁別いき成分との加法性の検討。昭和59年照明学会全国大会講演論文集（1984）72

(8)宇野智恵子、武内徹二、猪野原 誠、成定康平：視感輝度の定量化に関する仮説の検討。昭和59年照明学会全国大会講演論文集（1984）119

(9)堀井 滋、重田照明、武内徹二：小形視感輝度計の試作。昭和59年照明学会全国大会講演論文集（1984）120

(10)吉村義典、武内徹二、成定康平：トンネル入口部における先行車のブライトネス。昭和59年交通眼科学会（1984）1

(11)宇野智恵子、武内徹二、猪野原 誠：ブライトネス（旧称：視感輝度）の尺度の拡張。昭和60年照明学会全国大会講演論文集（1985）86

(12)大竹史郎、武内徹二、吉村義典：視物質濃度の計算に基づく中心窩順応輝度の予測。昭和61年電気関係学会関西支部連合大会予稿集（1986）G362

(13)武内徹二、成定康平：ブライトネスの定量化。平成4年度照明学会全国大会講演論文集（1992）81

(14)武内徹二、清水正則、宮川勝海、小林浩之：トンネル入口部での先行車の視認性（その1）－ブライトネスと視認性－。平成7年度照明学会全国大会講演論文集、（1995）144

3. その他の投稿論文

- (1) Ikeda M., Takeuchi T.: Influence of foveal load on the functional visual field. Perception & Psychology, Vol.18 (1975) 255-260
- (2)武内徹二、宇野智恵子、吉田忠弘：CRT表面屁の光源の映り込みの評価方法。第2回ヒューマン・インターフェース・シンポジウム論文集（1986）131-136
- (3)武内徹二、宮前あつ子：街路・防犯照明の照明要件の検討。第3回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集（1987）199-202
- (4)宮前あつ子、武内徹二：街路・防犯照明における顔の見え方と照明レベル。照明学会誌、Vol.73（1989）303-306
- (5) Miyamae A., Takeuchi T.: Illuminance to be provided for residential roads. J. Light & Vis. Env. Vol.14 (1990) 77-83

謝 辞

この論文は、京都大学教授池田光男博士のご指導によってまとめたものであります。ご多忙の中、終始懇切なご指導を賜った教授に対して、深く感謝申し上げます。

また、京都大学教授川崎清博士と同教授銚井修一博士には、ご多忙にもかかわらず本論文の全般にわたり詳細に査読を賜り、ご助言を頂きました。心から感謝申し上げます。

本研究の遂行において、松下電器産業株式会社照明研究所の吉村義典参事には、終始緊密なご指導と、有益なご助言を頂きました。また、松下電器産業株式会社照明研究所の猪野原誠主席研究員には、懇切なご指導とご助言を頂きました。ここに改めて深謝申し上げます。また、当時、松下電器産業株式会社照明研究所の所員であった、宇野智恵子氏と宮前あつ子氏には、本研究の実験と解析にあたって多大なご協力を頂きました。ここで両氏に改めて厚く感謝の意を表します。

最後に、この研究は松下電器産業株式会社照明研究所において行なったものがあります。照明研究所の当時の所長成定康平博士（現在、中京大学教授）からは、この研究の機会を頂くとともに、本研究の遂行においてご指導を賜り数多くのご助言を頂きました。また、照明研究所の現所長金井謙二博士からは、ご助言と温かい激励を受けました。金谷末子参事と坂本正悦主席研究員には、本研究の遂行にあたってご助言と温かい激励を受けました。また、堀井滋主席研究員、大竹史郎主任研究員、清水正則研究員、山中泰彦氏の各氏には本研究における実験や解析に大きな力添えを頂きました。ここに、心からの感謝の意を表します。

本研究は以上の方々をはじめとする多くの方々のご指導とご助力によりまとめることができました。ここに改めて深謝申し上げます。